

Министерство образования и науки Российской Федерации
Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

Л. И. Каплун

А. В. Малыгин

О. П. Онорин

А. В. Пархачев

УСТРОЙСТВО И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ

Учебное пособие

Екатеринбург
УрФУ
2016

УДК 669.162.2(075.8)

ББК 34.323-5я73

К65

Рецензенты: д-р техн. наук., проф. В. А. Бигеев (зав. кафедрой металлургии черных металлов Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова); гл. науч. сотр. ИМЕТ УрО РАН, д-р техн. наук, проф. А. Н. Дмитриев

Научный редактор – д-р техн. наук, проф. Н. С. Шумаков

Каплун, Л. И.

К65 Устройство и проектирование доменных печей: учебное пособие / Л. И. Каплун, А. В. Малыгин, О. П. Онорин, А. В. Пархачев. – Екатеринбург : УрФУ, 2016. – 219, [1] с.

ISBN 978-5-321-02486-7

В учебном пособии представлены этапы развития профиля доменной печи в России и за рубежом, приведены существующие методики его расчета, проанализированы вопросы рационального профилирования. Подробно описана конструкция доменной печи (фундамент, кожух, несущие металлоконструкции, газоотводы); рассмотрены назначение и условия службы огнеупорной кладки, применяемые огнеупорные материалы; конструкции холодильников и систем охлаждения доменной печи; устройство лещади и горна, заплечиков, распара и шахты, колошника и купольной части печи; оборудование горна печи (чугунные и шлаковые летки, фурменное устройство), а также современные загрузочные аппараты доменных печей, в том числе бесконусное загрузочное устройство (БЗУ) и роторное загрузочное устройство (РЗУ), и устройства для контроля за уровнем шихты в печи.

Представлен обширный справочный материал по современным огнеупорным материалам для кладки доменной печи. Приведенные в пособии алгоритмы расчетов сопровождаются численными примерами.

Учебное пособие рекомендовано для специалистов, бакалавров и магистров, обучающихся по направлениям подготовки высшего образования 22.03.02 и 22.04.02 – «Металлургия» и специализирующихся по металлургии черных металлов. Может быть полезно инженерно-техническим работникам доменных цехов, а также специалистам проектно-исследовательских и экспертных организаций, работающим в области доменного производства.

Библиогр.: 14 назв. Табл. 16. Рис. 99.

УДК 669.162.2(075.8)

ББК 34.323-5я73

ISBN 978-5-321-02486-7

© Уральский федеральный университет, 2016

© Каплун Л. И., 2016,
Малыгин А. В., 2016,
Онорин О. П., 2016,
Пархачев А. В., 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	4
ВВЕДЕНИЕ	5
1. ПРОФИЛЬ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ.....	9
1.1. Основные этапы развития профиля печи	9
1.2. Методология расчета профиля доменной печи.....	19
1.3. Некоторые вопросы рационального профилирования доменной печи	33
2. КОНСТРУКЦИЯ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ.....	41
2.1. Фундамент.....	41
2.2. Кожух печи.....	44
2.3. Несущие металлоконструкции.....	53
2.4. Колошниковое устройство	57
2.5. Газоотводы	62
3. УСТРОЙСТВО ОГНЕУПОРНОЙ КЛАДКИ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ	64
3.1. Назначение и условия службы огнеупорной кладки.....	64
3.2. Огнеупорные материалы	68
4. КОНСТРУКЦИИ ХОЛОДИЛЬНИКОВ И СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ	83
4.1. Конструкции холодильников	83
4.2. Системы охлаждения доменных печей.....	91
4.3. Охлаждение лещади	99
4.4. Уход за охлаждающей системой доменной печи	101
5. КОНСТРУКЦИИ ОТДЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ...	105
5.1. Устройство лещади и горна	105
5.2. Устройство заплечиков.....	126
5.3. Устройство распара и шахты	129
5.4. Устройство и футеровка колошника печи.....	141
5.5. Конструкция купольной части доменной печи.....	144
6. ОБОРУДОВАНИЕ ГОРНА ПЕЧИ	145
6.1. Чугунные и шлаковые летки	145
6.2. Фурменное устройство	148
6.3. Определение прогара воздушных фурм	159
6.4. Выбор количества воздушных фурм.....	161
7. ЗАГРУЗОЧНЫЕ УСТРОЙСТВА ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ	165
7.1. Двухконусное загрузочное устройство.....	166
7.2. Бесконусные загрузочные устройства	183
7.3. Роторное загрузочное устройство	199
8. УСТРОЙСТВА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЗА УРОВНЕМ ШИХТЫ В ДОМЕННОЙ ПЕЧИ	210
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИХ СПИСОК	216

ПРЕДИСЛОВИЕ

В учебном пособии рассматриваются конструкции и оборудование современных доменных печей различных поколений, эксплуатирующихся в настоящее время в России, а также приводятся некоторые методики, необходимые для обоснования проектных решений. Это позволяет не только изучить существующую технику доменного производства, но и учесть современные тенденции ее дальнейшего совершенствования. Пособие предназначено для студентов, бакалавров и магистров, обучающихся по направлению «Металлургия» и специализирующихся по металлургии черных металлов, при изучении ими дисциплин «Устройство и проектирование доменных цехов», «Технологическое проектирование доменного производства», а также может быть полезно для технологического персонала доменных цехов и специалистов проектно-конструкторских организаций. Изучение этих дисциплин предполагает, что обучающиеся ознакомлены с ранее пройденными дисциплинами «Теория и технология доменной плавки», «Бескоксовая металлургия», а также «Технология и служба огнеупоров».

Учебное пособие является совместным трудом преподавательского состава кафедры «Металлургия железа и сплавов» УрФУ. Авторы выражают глубокую благодарность и признательность ведущим специалистам доменного производства ОАО «Чусовской металлургический завод» и ОАО «ЕВРАЗ-НТМК» за предоставленную техническую информацию.

ВВЕДЕНИЕ

Основным агрегатом для получения чугуна из железорудных материалов является доменная печь – шахтный плавильный агрегат непрерывного действия. Все протекающие в доменной печи процессы (теплообмен, восстановление, разложение плавильных материалов и т. д.) осуществляются в потоке движущихся навстречу друг другу кусковых материалов шихты и восстановительного газа. Протекание физико-химических и тепловых процессов в противоточном режиме определяет их высокую эффективность. Так, например, коэффициент использования тепла в доменной печи (тепловой КПД) достигает в иных случаях 70–80 %, что является совершенно недостижимым для других типов металлургических печей. Высока и степень использования основных газообразных восстановителей – монооксида углерода (CO) и водорода (H₂). На хорошо работающих доменных печах состав выходящего из печи газа приближается к равновесному, т. е. максимально возможной степени использования его восстановительного потенциала. Высокая эффективность доменного процесса предопределяет то, что (по словам академика Бардина) доменная печь на ближайшее обозримое будущее является единственным восстановительным агрегатом для массового производства черных металлов.

Становление и развитие доменного производства как основного способа получения чугуна относится к XVIII–XX векам и стало возможным благодаря целому ряду важнейших изобретений и достижений научно-технической революции, часть из которых представлена в табл. В1.

Таблица В1

Основные этапы развития доменного производства

Дата	Этап развития
XIV в.	Появление первых доменных печей в Европе
1701 г.	Получен первый чугун в Невьянской домне (высота печи 12 аршин, производительность 124 пуда чугуна в сутки)
1735 г.	А. Дерби-сын получил патент на коксование каменного угля. Доменная плавка на коксе проводилась на заводе Колбрукдейль (Англия)

Дата	Этап развития
1755 г.	Первое применение паровой машины для привода воздуходувного компрессора, подающего дутье в доменную печь завода Брэдли (Вилькинсон, Англия)
1765–1767 гг.	И. И. Ползунов впервые в мире построил пароатмосферную (воздуходувную) машину на Колыново-Вознесенском заводе в Барнауле (Россия)
1768–1769 гг.	Джон Смитон предложил использовать цилиндрические воздуходувные машины для подачи дутья в доменные печи (Шотландия)
1769 г.	Д. Уатт получил первый патент на паровую машину – «Способ уменьшить в огневых машинах потребление пара и, следовательно, топлива» (Англия)
1781 г.	Д. Уатт получил второй патент на пять решений использования упругой силы пара (Англия)
1784 г.	Построен универсальный паровой двигатель (Д. Уатт, Англия)
1790 г.	И. Г. Зыков ввел в работу поршневые воздуходувки на Петрокаменском и Невьянском заводах (Россия)
1799 г.	Седдегер исследовал возможности применения нагретого дутья (Англия)
1812 (1822) г.	Леукс (Лейс) предложил нагревать дутье для доменной печи (Германия)
1828 г.	Джеймс Нельсон получил патент на «Нагрев дутья перед подачей его в доменную печь». Осуществлено в 1829 г на заводе «Клейд» (Шотландия)
1830 г.	Штротмейер предложил добавлять пар к дутью (Германия)
1831 г.	Джон Дейвис предложил вдувать пылевидный уголь в фурмы доменной печи (Англия)
1838 г.	Дж. Вандель предложил взамен кирпичных устоев, которые держали кладку шахты, использовать опорное кольцо и чугунные колонны
1838 г.	Барнет получил патент на вдувание природного газа и нефти в фурмы доменных печей (Англия)
1839 г.	Джон Гиббоне опубликовал статью о «естественном» рациональном профиле доменной печи (Англия)
1840–1850 гг.	Сооружение доменных печей с тонким каменным, а затем и металлическим кожухом (Шотландия)
1850 г.	Изобретение засыпного устройства «воронка-конус» для загрузки шихты в доменную печь (Парри, Англия)
1857 г.	Э. Каупер предложил способ нагрева воздуха и конструкцию кирпичного регенеративного воздухонагревателя
1865 г.	Н. Солли изобрел воздушную фурму с внутренней полостью, охлаждаемой водой. Фурмы изготавливались литыми из бронзы (Шотландия)
1867 г.	Люрман изобрел шлаковую фурму. Впервые шлаковая фурма установлена на заводе «Фриденсхютте» (Германия)
1871 г.	Г. Бессемер получил патент США № 117246 на способ доменной плавки с высоким давлением в рабочем пространстве печи
1876 г.	Г. Бессемер получил патент на технологию работы доменных печей на дутье, обогащенном кислородом (США)
1877 г.	К. Амберс получил патент на вдувание угля в фурмы доменных печей (Германия)
1882 г.	Первое применение углеродистых огнеупоров для футеровки доменных печей (Ф. Бургес, Германия)
1886 г.	Изобретение вращающегося распределителя к засыпному аппарату (Браун)

Дата	Этап развития
1887 г.	Изобретена паровая турбина (К. Лаваль, Швеция)
1894 г.	На заводе Камбрия-Вон изобретена пушка для забивки чугунной летки леточной массой (США)
1899 г.	Пуск в эксплуатацию первой печи с тонкостенной шахтой Бургеса на заводе «Вулкан» около Дуйсбурга (Германия)
1907 г.	Приобретение патента на изобретение вращающегося распределителя шихты фирмой Мак-Ки (США)
1913–1914 гг.	На заводе Угре-Мари осуществлены опыты по применению в доменной плавке дутья, обогащенного кислородом (Бельгия)
1915 г.	П. М. Есманский высказал предположение, что «работа доменной печи при более высоком давлении в ее пространстве будет более эффективной» (Россия)
1938–1948 г.	Начало широкого применения агломерата в шихте доменных печей (П. И. Коробов, А. Ф. Борисов, Л. Д. Юпко, Россия, Украина)
1954 г.	Разработка конструкции и сооружение цельноуглеродистой лещади на печи № 8 ММК (Россия)
1958–1959 гг.	Освоение технологии доменной плавки с применением природного газа в сочетании с обогащенным кислородом дутьем (Л. Д. Юпко, В. И. Литвиненко, Украина)
1958 г.	Изобретение системы испарительного охлаждения промышленных печей (авт. св. СССР № 70344, Украина)
1959 г.	Изобретение распределительно-засыпного аппарата с односкатным вращающимся лотком-желобом (авт. св. СССР № 125576, Е. Ф. Вегман, А. А. Вагин, Россия)
1960–1970 гг.	Применение воздушного охлаждения лещади доменной печи (Россия, Украина)
1969 г.	Разработка распределительно-засыпного аппарата с односкатным вращающимся лотком-желобом, меняющим угол наклона (собственность фирмы «Пауль Вюрт», патент Франции № 2053327, патент ФРГ № 2035458, Р. Мар, Э. Лежи, Франция)
1980–1987 гг.	Укладка в лещади доменных печей графитовых, полуграфитовых и углеродистых блоков с микропористой структурой (страны ЕЭС)
1982 г.	Разработка конструкции, строительство и эксплуатация бесшахтного воздухонагревателя печи № 4 НТМК (В. С. Новиков, Н. М. Бабушкин, Я. П. Калугин, Россия)
1983–1986 гг.	Монтаж подвижных плит колошника на доменных печах ЗСМК и КМК (Россия)
1985 г.	Разработка и применение медных вертикальных плит для охлаждения кладки доменных печей. Фирмы «Маннесман» и «Тиссенштал» (ФРГ)
1985–1992 гг.	Проектирование, изготовление, монтаж и начало эксплуатации на ЗСМК роторного загрузочного устройства (авт. св. России № 969739, Б. И. Ашпин, А. С. Шинкаренко, И. Г. Игонин, А. И. Нефедов, В. И. Люленков, Е. И. Гринберг (Россия)
1992 г.	Впервые в практике доменного производства осуществлено водяное охлаждение подлещадного пространства доменной печи № 1 ЗСМК объемом 3000 м ³ (Россия)

С момента возникновения и до настоящего времени доменное производство претерпело громадные качественные изменения. Увеличение производства чугуна привело к созданию высокопроизводительных доменных печей большого объема (рис. В1) с высокой степенью механизации и автоматизации технологического процесса.



Рис. В1. Доменное производство комбината Shougang (Китай); современные технологии производства чугуна

Улучшение технико-экономических показателей работы печей и увеличение продолжительности их кампании невозможно без внедрения новых конструктивных решений в устройстве как самих доменных печей, так и вспомогательного оборудования. В первую очередь это касается выбора рационального профиля печей, а также применения высококачественных огнеупорных материалов, современных систем охлаждения и загрузочных устройств.

1. ПРОФИЛЬ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

1.1. Основные этапы развития профиля печи

Вертикальное осевое сечение рабочего пространства доменной печи называется ее профилем. Профиль доменной печи, ограничивающий ее рабочее пространство, так называемый «полезный объем», является важнейшей частью конструкции печи. В зависимости от его очертаний доменная печь может быть склонна к периферийному или осевому ходу, к неустойчивости заданного режима и даже к образованию настывлей. Поэтому исключительно важно создание так называемого «рационального» профиля, обеспечивающего стабильный ровный ход и максимальное использование восстановительной способности газа.

Профиль первых доменных печей ничем не отличался от профиля домниц, представляющего собой два усеченных конуса, поставленных друг на друга большими основаниями (рис. 1.1, *а*). При разгаре огнеупорной кладки наблюдалось повышение производительности печи и снижение расхода топлива (увеличивались объем печи и время контакта газа с шихтовыми материалами). Поэтому размеры рабочего пространства печи стали увеличивать. Однако увеличению высоты печи и диаметра горна препятствовала малая мощность воздушных средств, расширению колошника – ручная загрузка шихты. Производительность печей оставалась крайне низкой и не превышала 1,6 т/сут.

Объем печи увеличивали преимущественно путем расширения распара. В 30-х годах XIX века характерной была немецкая печь завода «Фекерхаген» (рис. 1.1, *б*). В таких печах плохо использовались газы, так как они обрабатывали только центральный столб материалов, а на периферии распара шихтовые материалы не участвовали в процессе.

Низкая производительность и неэкономичная работа печей с широким распаром заставила доменщиков увеличивать диаметр горна. Замедленный рост диаметра распара при непрерывном росте диаметра горна сопровождался увеличением угла наклона и уменьшением высоты заплечиков. Это привело к увеличению производительности печей и снижению удельного расхода топлива

вследствие улучшения условий опускания шихты в заплечиках и распределения газового потока в шахте печи. Поэтому стали считать, что диаметр горна, независимо от остальных размеров профиля, является единственной величиной, определяющей производительность доменной печи.

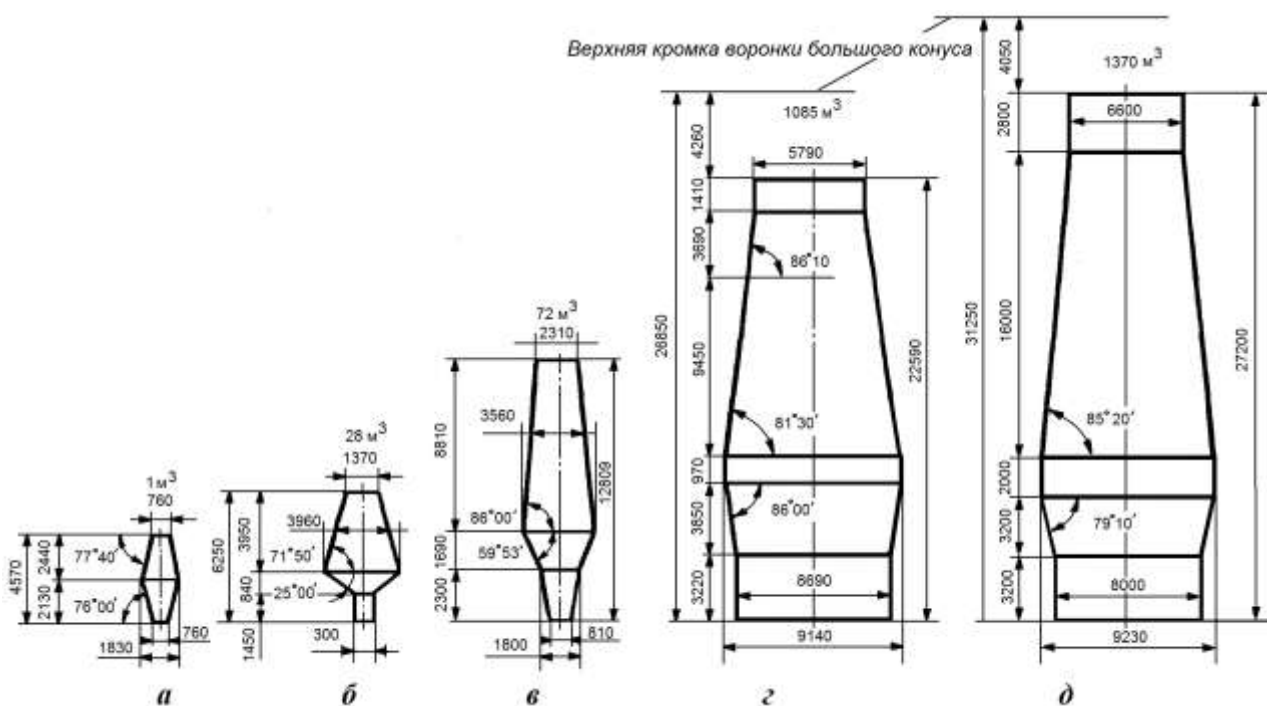


Рис. 1.1. Развитие профиля доменной печи [1]

Более верным путем шло развитие доменного производства в России на Урале. Основное отличие уральских печей от западноевропейских – не только большой (примерно в 3,0–3,5 раза) полезный объем, но и значительная разница соотношений главных размеров профиля. Отношение диаметра распара к диаметру горна было меньшим, диаметра колошника к диаметру распара d_k/D – бóльшим (до 0,75). Так, еще в 1740 г., т. е. за 100 лет до создания такого несовершенного профиля, как печь завода «Фекерхаген», на Невьянском заводе (Урал) была построена печь высотой 12,8 м (рис. 1.1, в). Печь Невьянского завода имела расширяющийся кверху горн, образующий широкое сечение в месте стыка с более крутыми заплечиками. Она была первой в мире по высоте при плавке на древесно-угольном топливе и долго сохраняла первенство по производительности благодаря своим размерам и конфигурации профиля. Изобрете-

ние в 1765 г. И. Ползуновым паровой машины с цилиндрическими мехами, испытанными на Нижнетагильском заводе (Урал), позволило увеличить высоту печей, избежав нерациональных профилей, существующих на печах стран Западной Европы.

В 1839 г. английский металлург Дж. Гиббонс в работе «Практические заметки о конструкции доменных печей Страффордшира», обратив внимание на характер и величину износа огнеупорной кладки печей, высказал предположение, что внутреннее очертание рабочего пространства заранее должно иметь форму, получаемую в результате разгара, для предотвращения интенсивного разрушения стен печи в первые же месяцы работы. При этом общая продолжительность кампании печи значительно увеличится. Построенная по этому принципу печь (рис. 1.2) имела увеличенный диаметр горна, более крутые и высокие заплечики и расширенный колошник. Ее проектная производительность была достигнута значительно быстрее обычного, производство намногое превышало предыдущий уровень, а продолжительность кампании в 7 лет была рекордной для того времени. Предложенный Дж. Гиббонсом принцип проектирования в то время не получил распространения, но мысль о применении «естественного» профиля использовали через много лет при создании рационального «жесткого» профиля печей с тонкостенной шахтой в СССР и за рубежом.

С появлением паровых машин и совершенствованием воздуходувных средств, а также с переходом на минеральное горючее высоту печей стали увеличивать. Целесообразность увеличения высоты печи была обоснована Л. Грюнером (Франция) в опубликованных им записках по истории доменной плавки (1876). Он показал, что чем больше отношение высоты печи к диаметру распара, тем выше ее производительность и меньше удельный расход кокса. Наилучшие результаты получали при отношении $H_0/D = 4,0$ для коксовых печей и 4,33 для древесно-угольных. В соответствии с рекомендациями Л. Грюнера при увеличении полезной высоты печи до 27–30 м отношение ее к диаметру распара стабилизировалось на уровне 4,0–4,5. Непрерывное расширение горна обусловило увеличение угла наклона и уменьшение высоты заплечиков до

3,0–3,5 м. Это способствовало улучшению схода шихты и распределению газового потока по сечению печи.

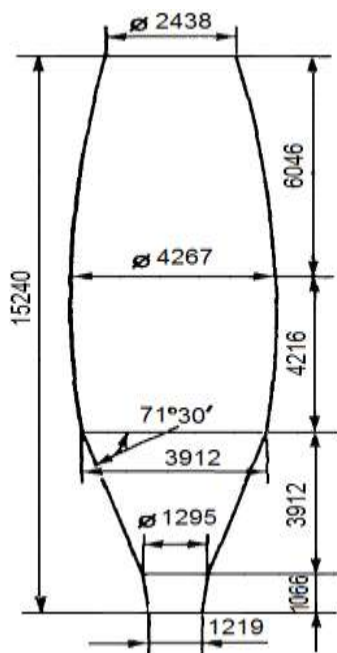


Рис. 1.2. Профиль Дж. Гиббонса (1839); полезный объем 141 м³; суточная выплавка (в среднем) 15 т чугуна [1]

В период 1880–1920 гг. полезный объем печей, особенно в США, возрос до 700–800 м³ при отношении $H_0/D \sim 4,0$. При этом считали, что увеличение диаметра горна, достигшего за указанный период 4,5–6,5 м, является главным условием увеличения производительности печи независимо от других элементов профиля. Опасение ухудшить распределение материалов при увеличении диаметра колошника долгое время сдерживало увеличение его размера. Одностороннее развитие горна привело к созданию бутылкообразного профиля доменной печи с преувеличенным диаметром горна и суженным колошником (рис. 1.1, з). Опыт эксплуатации таких печей показал, что производительность их не увеличивалась пропорционально площади поперечного сечения горна: узкий колошник препятствовал прохождению большого количества газов, что ограничивало производительность доменной печи.

Плохая работа печей с бутылкообразным профилем привела к увеличению диаметра колошника (рис. 1.1, д). Современные доменные печи характеризуются профилем с рациональным соотношением размеров отдельных элементов, что обеспечивает высокую производительность при низком удельном расходе топлива. Размеры профилей типовых доменных печей СССР приведены

в табл. 1.1. Как следует из приведенных данных, увеличение полезного объема печей производится в первую очередь за счет увеличения их поперечных размеров.

Отношение поперечных размеров к высоте неуклонно повышается: отношение полезной высоты к диаметру распара снизилось с 3,18 для печи полезным объемом 1033 м³ до 2,24 для печи полезным объемом 5000 м³ и до 2,11 для печи полезным объемом 5580 м³. Соотношения диаметров колошника и распара, а также распара и горна изменялись мало вследствие преимущественного увеличения полезного объема печей за счет поперечных размеров и относительно небольшого увеличения полезной высоты.

Для большинства мощных печей Японии отношение полезной высоты к диаметру распара принято равным 2,11–2,01, на заводе «Оита» (печь № 1) оно составляет 1,97. В США на вновь строящихся печах отношение $H_0/D = 2,24$ с тенденцией снижения его до 2,15 (рис. 1.3).

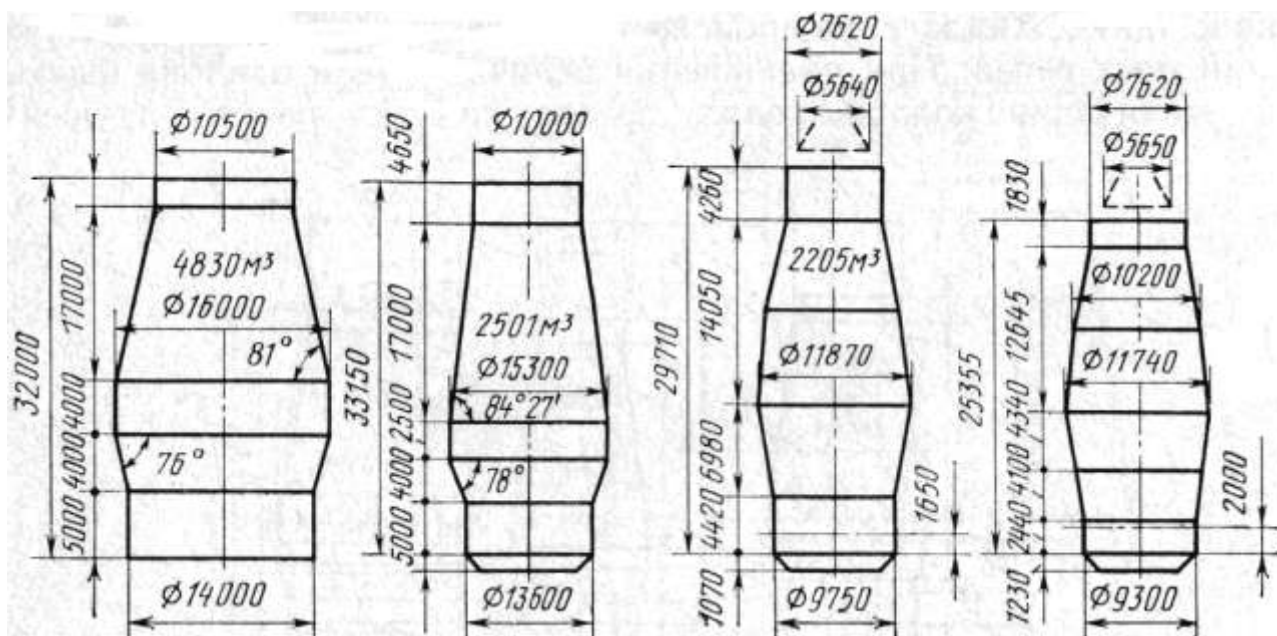


Рис. 1.3. Профили доменных печей зарубежных заводов [1]:
а – «Тиба» (Япония); *б* – «Швельгерн» (ФРГ); *в* – «Гамильтон» (Канада);
г – «Армко» (Аманда, США)

Таблица 1.1

Конструктивные размеры типовых доменных печей (проект «Гипромеза»)

Размеры профиля	Полезный объем печи, м ³									
	1033	1386	1513	1719	2000	2300	2700	3000	3200	5000
Высота полная (H_p), мм	28700	31 225	30750	31250	32358	33 150	33650	34950	35290	36100
Высота полезная (H_0), мм	26000	27300	28000	28500	29400	30200	31200	32200	32 190	33500
Высота горна (h_r), мм	3200	3200	3200	3200	3600	3800	3900	3900	3900	4400
Высота заплечиков (h_3), мм	3000	3200	3200	3000	3000	3200	3400	3200	3400	3700
Высота распара (h_p), мм	2000	2000	1800	2000	1700	1700	2200	2000	2300	1700
Высота шахты ($h_{ш}$), мм	15000	16000	17300	17800	18200	19000	18700	20 100	19600	20700
Высота колошника (h_k), мм	2800	2900	2500	2500	2900	2500	3000	3000	2990	3000
Высота «мертвого слоя», мм	600	450	766	1099	1101	—	1699	1740	—	1113
Диаметр горна (d_r), мм	7200	8200	8600	9100	9750	10500	11000	11600	12000	14700
Диаметр распара (D), мм	8200	9300	9600	10200	10900	11 700	12300	12800	13 100	16 100
Диаметр колошника (d_k), мм	5800	6500	6600	6900	7300	7300	8100	8400	8900	10800
Диаметр большого конуса, мм	4200	4800	4800	5000	5400	5400	6200	6500	7000	—
Колошниковый зазор, мм	800	850	900	950	950	950	950	950	950	—
Угол наклона шахты, град	85°25'34"	84°59'52"	85°02'40"	84°42'14"	84°21'06"	83°23'47"	83°35'33"	83°45'14"	83°53'	82°42'17"
Угол наклона заплечиков, град	80°32'15"	80°14'51"	81°07'10"	79°36'40"	79°09'	79°22'49"	79°10'38"	79°22'49"	80° 49'	79°17'13"
Величина отношения $H_0 : D$	3,18	2,94	2,92	2,79	2,70	2,68	2,64	2,51	2,46	2,24
Величина отношения $d_k : D$	0,71	0,70	0,69	0,68	0,67	0,63	0,66	0,656	0,675	0,67
Величина отношения $D : d_r$	1,14	1,13	1,12	1,12	1,12	1,11	1,12	1,12	1,09	1,095
Количество воздушных фурм	16	16	18	18	20	20	20	28	28	36
Количество чугунных леток	1	1	1	1	1 (2)	2	2	3	4	4
Количество шлаковых леток	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1

В Канаде, ФРГ, Франции, Англии, Бразилии, Нидерландах $H_0/D = 2,17-2,30$. Рекомендованные ранее величины отношения H_0/D , равные 4,0 (Л. Грюнер), 3,5 (М. Павлов и А. Ледебур), 2,59 (А. Рамм) и в свое время способствовавшие равномерному распределению газового потока, в настоящее время утратили свое значение, так как условия форсирования плавки требуют в первую очередь обеспечения ровного хода печи, что достигается снижением указанного отношения.

Изменения в технологии доменной плавки привели к усовершенствованию и других элементов профиля. Так, снижено соотношение диаметров колошника и распара (d_k/D), величина которого в настоящее время как в нашей стране, так и за рубежом считается оптимальной в пределах 0,65–0,67. Это связано с улучшением условий протекания обычных для распара процессов при его расширении: меньше влияние вязкости первичных шлаков, разрушение кокса. Расширение распара при умеренном увеличении высоты печей и при относительно постоянном соотношении диаметров распара и горна привело к уменьшению угла наклона шахты. При уменьшении угла наклона шахты и увеличении колошникового зазора на этих печах улучшена газопроницаемость периферии, особенно для шихтовых материалов мелких фракций. Тем самым предупреждается излишнее развитие осевых потоков газа. Так, угол наклона шахты печи объемом 4830 м³ и колошником 10500 мм (завод в Тиба, рис. 1.3, а) составляет 81°, а на заводах «Сумитомо Киндзоку Коге» и «Кимицу» на доменных печах с диаметрами колошников 11200 и 9500 мм – 81°22' и 80°22' соответственно.

С увеличением диаметра горна угол заплечиков не уменьшают для предупреждения образования застойных зон на периферии и лучшего схода шихты в центральной зоне, что приобретает особое значение на печах с большими поперечными размерами профиля. Угол заплечиков современных печей России и Японии составляет в среднем 79–80°. Печи Франции, Бразилии, США, ФРГ имеют углы заплечиков 80–84°; исключением является одна из

печей на заводе «Тиба» (Япония) – 76° и печь объемом 3600 м^3 завода «Швельгерн» (ФРГ, 1973) – 78° .

При широких горне и распаре печи СССР характеризовались в среднем несколько большим значением отношения D/d_r , а следовательно, и более крутыми заплечиками, угол наклона шахты примерно одинаков.

История развития профиля доменной печи имеет много этапов – от крайне несовершенного профиля завода «Фекерхаген» (Германия) до современных типовых, рассчитанных на любые условия плавки. Однако практика строительства и работы современных доменных печей показала, что использование типового профиля нельзя считать правильным, поскольку различные минералогические, гранулометрические и физико-химические особенности разного минерального сырья вносят свою специфику в процесс его переработки в доменной печи. В последние годы как за рубежом, так и на отечественных предприятиях печи сооружают не по типовым, а по индивидуальным проектам. Эти печи значительно отличаются как профилем, так и конструкцией.

Для современных доменных печей характерно сохранение соотношения полезной высоты и диаметра горна (рис. 1.4).

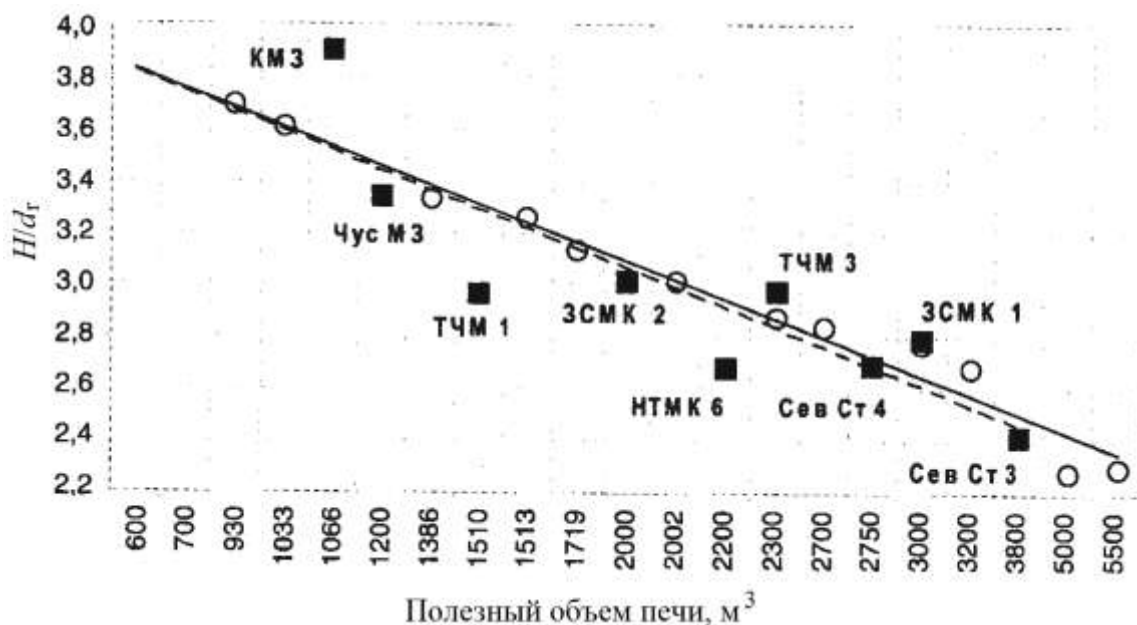


Рис. 1.4. Динамика изменения отношения полезной высоты к диаметру горна при увеличении полезного объема печи:

O – для типовых печей; ■ – для реконструированных печей

Отношение диаметра распара к диаметру горна увеличилось (рис. 1.5), что вызвано переходом на конструкцию печи с тонкостенной шахтой.

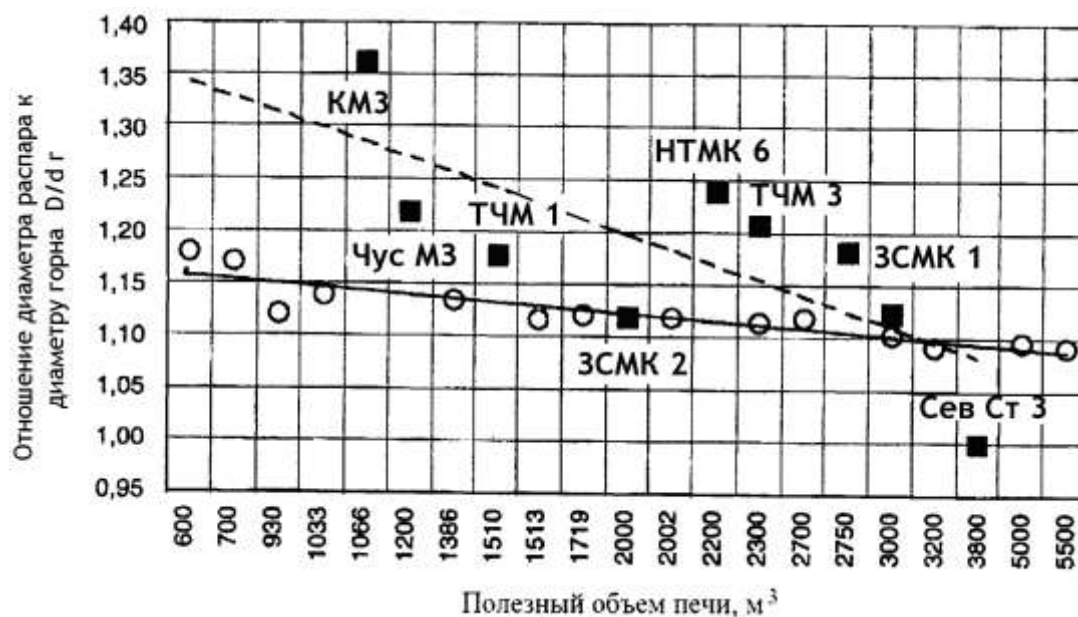


Рис. 1.5. Динамика изменения отношения диаметра распара к диаметру горна при увеличении полезного объема печи:

\circ – для типовых печей; \blacksquare – для реконструированных печей

Вновь построенные доменные печи наряду с бóльшим диаметром распара характеризуются меньшим углом наклона шахты. Имеет место тенденция увеличения высоты горна (рис. 1.6) и высоты «мертвого слоя» на лещади (рис. 1.7).

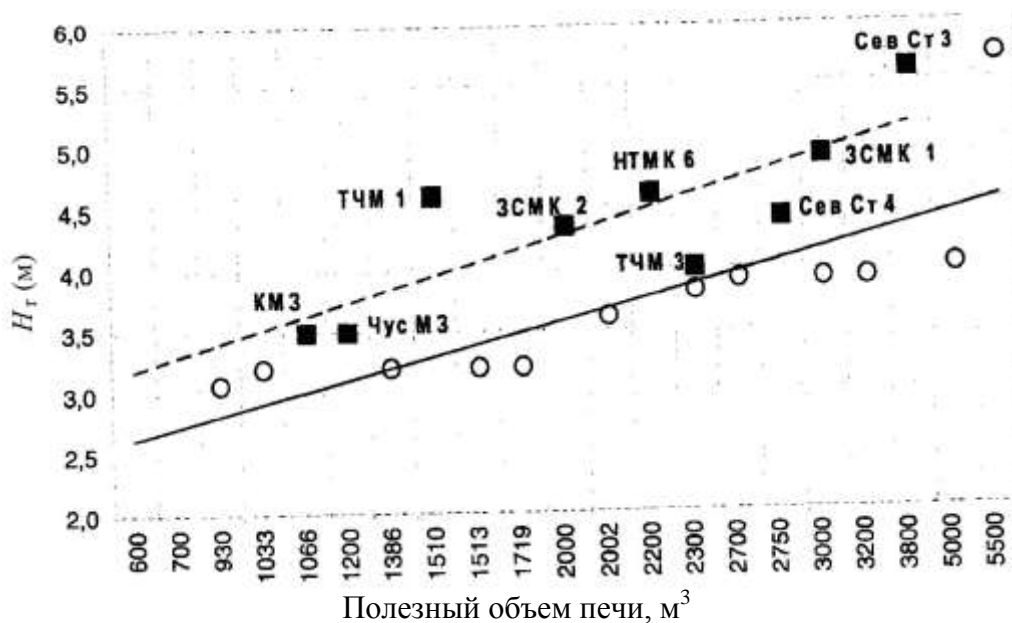


Рис. 1.6. Динамика изменения высоты горна при увеличении полезного объема печи:

\circ – для типовых печей; \blacksquare – для реконструированных печей

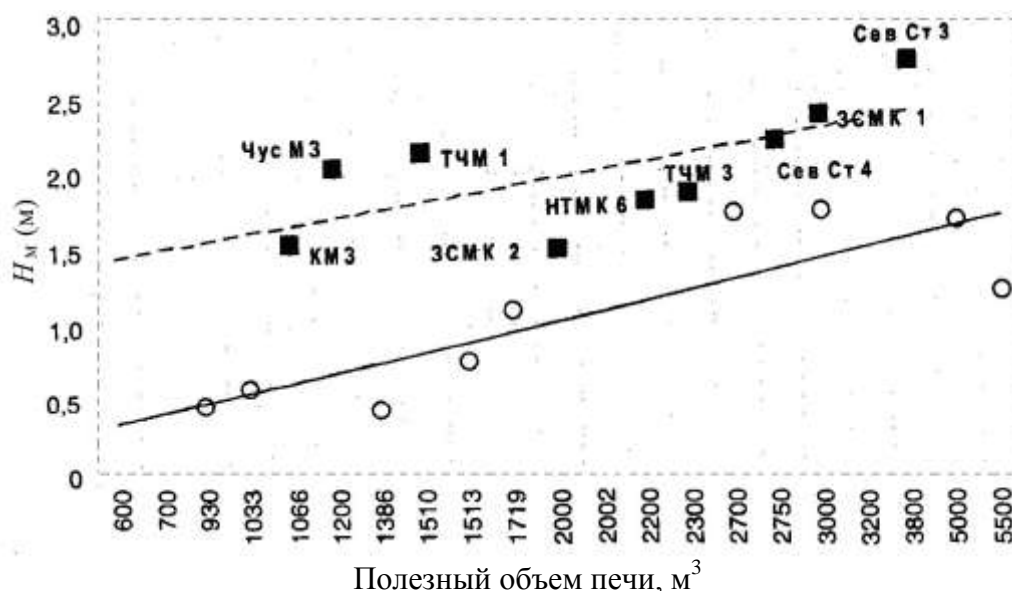


Рис. 1.7. Динамика изменения высоты «мертвого слоя» на лещади при увеличении полезного объема печи:
 О — для типовых печей; ■ — для реконструированных печей

Другим характерным элементом изменения профиля является использование переменного угла в верхней части шахты доменной печи. Как показывает практика, уменьшение угла наклона шахты в верхней ее части улучшает сход шихты и позволяет повысить производительность доменной печи.

Из печей с переменным углом наклона шахты особенно интересным является профиль печи в Аманде (см. рис. 1.3, *г*), имеющий высокие заплечики, низкий горн и шахту с двойным углом наклона стен. Очертание ее рабочего пространства приближается к овалу, близкому к тому, который имеет печь после разгара. Такие профили рассчитывают на шихту с высоким содержанием окатышей (до 100 %). Доменные печи с переменным углом наклона шахты в последние годы внедряются и в практику доменного производства России («ЕВРАЗ-НТМК», «Тулачермет»).

Еще одним характерным фактором изменения конструкции является увеличение количества фурм на большинстве доменных печей: для доменных печей с полезным объемом 1000–1200 m^3 оно составляет 16–18; для доменных печей с объемом 1700–2000 m^3 — 20; для печей с объемом 2700–3000 m^3 оно составляет 28–30 штук.

1.2. Методология расчета профиля доменной печи

Рабочее пространство современной доменной печи (рис. 1.8) состоит из трех цилиндрических частей (колошник, распар и горн) и двух частей, имеющих форму усеченного конуса (шахта и заплечики).

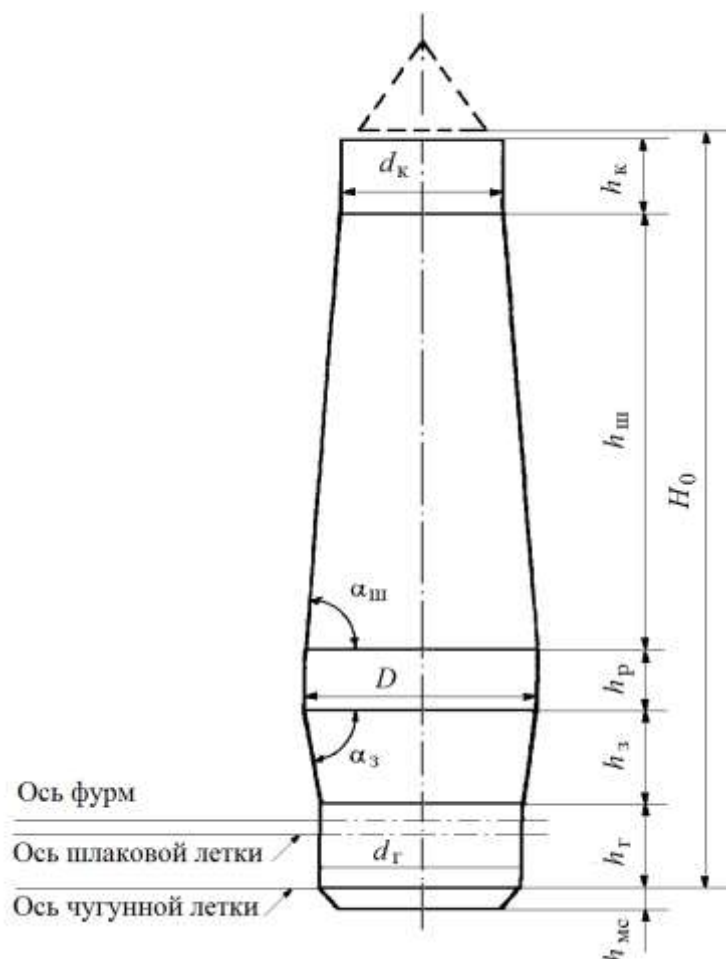


Рис. 1.8. Профиль доменной печи:

H_0 – полезная высота; h_{mc} – высота «мертвого слоя»; h_{Γ} – высота горна; h_z – высота заплечиков; h_p – высота распара; $h_{ш}$ – высота шахты; h_k – высота колошника; d_{Γ} – диаметр горна; D – диаметр распара; d_k – диаметр колошника; $\alpha_{ш}$ – угол наклона шахты; α_z – угол наклона заплечиков

Колошник – верхняя цилиндрическая часть печи. Основное назначение цилиндрического колошника печи – осуществлять направленное распределение шихтовых материалов при загрузке их в печь. Он подвергается ударному воздействию ссыпавшихся с большого конуса железорудных материалов, кокса и разнообразных добавок при его опускании. В целях сохранения диаметра и высоты колошника в процессе работы печи устанавливается броневая защита,

конструкция которой будет описана позже. Диаметр колошника может достигать 11 м, высота – 3 м. Шахта имеет форму усеченного конуса. Это самая большая по объему часть печи. В ней сосредоточены физико-химические процессы взаимодействия между твердыми шихтовыми материалами и газами.

Основная задача, возлагаемая на шахту печи, – восстановить железорудный материал. При движении материалов в этой зоне необходимо осуществить наибольшее развитие косвенного восстановления оксидов железа, что достигается большим временем пребывания материалов в шахте, а значит, большой ее высотой. При малой высоте шахты материалы приходят в нижнюю часть печи слабо восстановленными, что сопровождается увеличением степени прямого восстановления и возрастанием вследствие этого удельного расхода кокса. Для максимальной эффективности протекания физико-химических реакций столб шихты должен обладать высокой газопроницаемостью, которая ухудшается по мере продвижения материалов сверху в низ шахты из-за их частичного разрушения и термического расширения. Для сохранения высокой газопроницаемости столба шихтовых материалов шахта расширяется сверху вниз.

Распар – это наибольшая по диаметру цилиндрическая часть печи, предназначенная для плавного перехода шахты в заплечики. Размеры распара и расположение этого элемента профиля в печи должны соответствовать начальному этапу процесса шлакообразования. При переходе железорудных материалов в вязкие тестообразные массы на стадии их размягчения существенно уменьшается объем межкусковых пространств (порозность слоя шихты), что приводит к значительному возрастанию газодинамического сопротивления зоны шлакообразования. Для ликвидации подвисаний шихты необходимо снизить скорость движения газа в зоне шлакообразования. Это достигается установкой самой широкой части профиля доменной печи – распара. Высота распара 1,7–2,3 м, диаметр – до 16 м.

После процесса размягчения наступает следующий этап шлакообразования – появление первичного шлакового расплава, который характеризуется по-

вышенным содержанием очень агрессивного монооксида железа (FeO). Первичный шлаковый расплав разъедает огнеупорную кладку печи, поскольку FeO образует с оксидом кремния, находящимся в огнеупорах, легкоплавкое соединение – фаялит ($2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$). Возможность разрушения шамотной кладки железистым шлаковым расплавом является одной из причин выполнения шахты печи в виде усеченного конуса. Расширение печи способствует уменьшению времени контакта железистого шлака с кладкой.

Запечники доменной печи имеют форму обратного усеченного конуса. Сужение запечников связано с уменьшением объема движущихся в печи материалов в результате их расплавления. Кроме того, сужение печи ниже распара вызвано стремлением поместить фурменные очаги в направлении к оси печи в зону прохождения большей части рудных материалов, т. е. направить газовый поток из зоны горения в так называемый «рудный гребень». Высота запечников составляет 3,0–3,5 м.

Горн – это нижняя цилиндрическая часть печи. Высота горна 3,0–5,5 м, диаметр – до 15,5 м. Горн условно делится на две части. Верхняя часть, называемая фурменной зоной, равномерно по окружности имеет от 12 до 42 фурменных отверстий. В них вставляются фурменные приборы, через которые в печь под давлением 0,3–0,5 МПа подается нагретое до температуры 1100–1250 °С воздушное дутье. Перед фурмами происходит горение кокса, загружаемого в печь через колошник, а также топлива (природный газ, мазут, угольная пыль (ПУТ), коксовый газ), подающегося в печь через воздушные фурмы. Образовавшийся горновой газ, поднимаясь вверх, производит нагрев и восстановление железа и примесей шихты. Высота фурменной зоны составляет 1,0–1,2 м.

Нижняя часть горна называется металлоприемником. В металлоприемнике имеются специальные отверстия для выпуска шлака и чугуна. Эти отверстия называются летками. На печи имеется 1–2 летки для выпуска шлака и 1–4 – для выпуска чугуна. Через шлаковую летку из печи выпускается так называемый «верхний шлак», находящийся выше ее уровня. Шлак, расположенный ниже

этой летки («нижний шлак»), выпускается вместе с чугуном через чугунную летку. Для печей большого объема, оборудованных несколькими чугунными летками, а также при работе печей с малым удельным выходом шлака необходимость в устройстве шлаковых леток отпадает, поскольку из-за малого времени между смежными выпусками чугуна уровень шлака не достигает уровня шлаковой летки. При плавке титаномagnetитов (например, качканарского железорудного сырья) из-за образования чрезвычайно тугоплавких соединений – карбидов и карбонитридов титана (TiC и $TiCN$) – наблюдается возрастание вязкости шлака и увеличение количества чугуна, увлекаемого шлаком при его выпуске через шлаковую летку. Это приводит к прожиганию металлом элементов шлакового прибора. Вследствие этого при выплавке ванадиевого чугуна отработка верхнего шлака не производится.

Высота печи от подошвы чугунной летки до нижней кромки большого конуса засыпного аппарата или лотка бесконусного засыпного устройства (БЗУ) в опущенном состоянии называется полезной высотой печи (H_0). Объем печи, ограниченный полезной высотой, называется полезным объемом печи (V_0).

Ниже чугунных леток располагается зумпф (приямок). Его высота составляет 0,5–2,0 м. Назначением зумпфа, всегда заполненного жидким чугуном, является предохранение лещади печи (днища металлоприемника) от разрушающих воздействий потоков чугуна и шлака, а также абразивного износа коксом. Объем зумпфа не входит в полезный объем печи.

Надо отметить, что как в России, так и зарубежных странах нет четкой расчетной методики определения размеров основных элементов профиля доменной печи. Это связано прежде всего со сложностью протекающих в печи процессов и отсутствием вследствие этого обоснованной математической модели доменного процесса. Длительное время принципы расчета профиля печей считали секретом фирмы, и материалы, касающиеся этого вопроса, не публиковали. Только немецкий металлург А. Ледебур в 1873 г. впервые рекомендовал

рациональные, по его мнению, соотношения элементов профиля и установил методику определения их абсолютных размеров. Оценку работы доменной печи он характеризовал коэффициентом использования объема, выражая его количеством тонн чугуна, выплавляемого за сутки в одном кубическом метре объема печи ($\text{т} \cdot \text{сут} / \text{м}^3$). Используя этот коэффициент, А. Ледебур определял объем печи Q , необходимый для выплавки заданного количества чугуна в сутки, а затем и высоту печи:

$$H = 2,85Q^{1/3}, \quad (1.1)$$

где 2,85 – коэффициент, соответствующий определенным соотношениям высоты печи и других частей ее профиля при условии, что все размеры (высоты и диаметры отдельных элементов) прямо пропорциональны высоте печи. В частности, $h_r = 0,1H$; $h_z = 0,21H$; $h_p = 0,04H$; $h_{ш} = 0,65H$; $d_r = 0,17H$; $D = H/3,5 = 0,2857H$; $d_k = 0,2H$; $d_k = 0,2 \cdot 3,5 = 0,7D$. При этом остаются неизменными для различных условий работы печи углы наклона заплечиков, т. е. $0,5 (0,2857 - 0,1700)/0,21 = \text{ctg } \beta$ ($\beta = 74^\circ 37'$), и шахты $0,5 (2857 - 0,2000)/0,65 = \text{ctg } \alpha$ ($\alpha = 86^\circ 23'$).

Эти положения, как было установлено акад. М. А. Павловым, являлись ошибочными, так как размеры отдельных элементов профиля по мере увеличения высоты печи растут неодинаково, что подтверждается как изменением размеров их на протяжении всего развития профиля, так и практикой строительства печей более позднего времени.

Все существующие в настоящее время методы расчета профиля печи можно разделить на две группы – это статистические (метод А. Н. Рамма, Н. К. Леонидова) и метод расчета, предложенный в свое время академиком М. А. Павловым. Статистические методы связывают горизонтальные параметры профиля печи с ее полезным объемом, а также и полезную высоту эмпирическими уравнениями следующего вида:

$$d = k_1 \cdot V_0^{N1}, \quad (1.2)$$

$$H_0 = k_2 \cdot V_0^{N2}, \quad (1.3)$$

где k_1, k_2, N_1, N_2 – эмпирические коэффициенты;

H_0, d – соответственно полезная высота печи и диаметр какого-либо элемента профиля печи, м;

V_0 – полезный объем печи, м³.

При выводе расчетных уравнений как А. Н. Рамм, так и Н. К. Леонидов анализировали профили печей, которые характеризовались сравнительно высокими техническими показателями, и не принимали во внимание те доменные печи, которые в силу тех или иных причин имели низкую производительность и высокий удельный расход кокса.

В табл. 1.2 представлены расчетные уравнения, рекомендуемые А. Н. Раммом и В. К. Леонидовым для расчета профиля доменных печей необходимого объема.

Таблица 1.2

Уравнения для расчета размеров профиля доменной печи
статистическими методами

Элемент профиля печи	Метод А. Н. Рамма	Метод В. К. Леонидова
Диаметр, м:		
распар (D)	$D = 0,53 \cdot V_0^{0,40}$	$D = 0,384 \cdot V_0^{0,44}$
горн (d_r)	$d_r = 0,32 \cdot V_0^{0,45}$	$d_r = 0,342 \cdot V_0^{0,44}$
колошник (d_k)	$d_k = 0,50 \cdot V_0^{0,36}$	$d_k = 0,593 \cdot V_0^{0,33}$
Высота, м:		
полезная (H_0)	$H_0 = 6,14 \cdot V_0^{0,2}$	$H_0 = 6,42 \cdot V_0^{0,2}$
горн (h_r)	$h_r = 0,115 \cdot H_0$	$h_r = 0,125 \cdot H_0$
запечки (h_3)	$h_3 = 3,0$	$h_3 = 0,11 \cdot H_0$
распар (h_p)	$h_p = 0,08 \cdot H_0$	$h_p = 0,07 \cdot H_0$
шахта ($h_{ш}$)	$h_{ш} = 0,69 \cdot H_0 - 3,0$	$h_{ш} = 0,60 \cdot H_0$
колошник (h_k)	$h_k = 0,115 \cdot H_0$	$h_k = 0,095 \cdot H_0$

В основу метода М. А. Павлова по определению размеров профиля печи заложено три отношения: H_0/D , d_k/D и D/d_r , а также два угла – углы наклона стен шахты ($\alpha_{ш}$) и запечиков (α_3).

По рекомендации М. А. Павлова отношение полезной высоты печи (H_0) к диаметру распара (D) для печей того времени (печи малого объема) нужно было задавать в пределах 3,3–4,25. На современных доменных печах среднего и большого объема значение этого отношения снизилось до 2,10–2,45.

Положения, заложенные М. А. Павловым в методику расчета профиля печи, предполагают учет некоторых особенностей, присущих доменному процессу. Поэтому доменные печи, профиль которых выполнен согласно методике М. А. Павлова, как правило, характеризуются лучшими показателями работы.

Выбор значения H_0/D необходимо делать обоснованно. На печах с низким значением отношения полезной высоты к диаметру распара (т. е. печи низкие, но широкие) при всех равных условиях возможно получение высокой производительности. Это связано с большим поперечным сечением печи и малой скоростью движения газа в ней. В такую печь можно подавать большое количество дутья и получать высокую производительность, не опасаясь подвисаний шихты. Однако для таких печей характерно неравномерное распределение газового потока по сечению столба шихты и слабое использование восстановительной и тепловой работы газового потока. Из-за этого при хорошей производительности печи удельный расход кокса будет высоким. Напротив, в доменных печах с высоким значением H_0/D (высокие и узкие печи) будет наблюдаться более равномерное распределение газа по сечению шихты, что приведет к увеличению степени использования восстановительной и тепловой энергии газа и снижению удельного расхода кокса. Но в доменную печь такого профиля нельзя подать много дутья, поскольку из-за малого поперечного сечения печи увеличивается скорость движения газового потока и наступает подвисание шихты при сравнительно малом расходе дутья.

В табл. 1.3 в качестве примера приведены размеры профиля доменной печи № 2 Чусовского металлургического завода («ЧусМЗ») с полезным объемом 1033 м³.

Доменная печь № 2 Чусовского металлургического завода имела отношение $H_0/D = 3,17$, что соответствует рекомендуемым М. А. Павловым пределам для печей этого объема.

Таблица 1.3

Профиль доменной печи № 2 «ЧусМЗ»

Параметр	Размерность	Значение
Диаметр:		
горн (d_r)	мм	7200
распар (D)	мм	8200
колошник (d_k)	мм	5800
Высота:		
полезная (H_0)	мм	26000
горн (h_r)	мм	3200
запечки (h_z)	мм	3000
распар (h_p)	мм	2000
шахта ($h_{ш}$)	мм	15000
колошник (h_k)	мм	2800
«мертвый слой» ($h_{м.с}$)	мм	690
Угол:		
шахта ($\alpha_{ш}$)	град	85°25' 34"
запечки (α_z)	град	80°32' 17"
Отношение:		
d_k/D		0,71
D/d_r		1,14
H_0/D		3,17

Второе отношение, заложенное М. А. Павловым в метод расчета профиля печи, – это отношение диаметра колошника к диаметру распара (d_k/D). С этим отношением связан угол наклона стен шахты ($\alpha_{ш}$). Для чего шахта выполняется в виде усеченного конуса, расширяющегося вниз? Здесь имеется несколько соображений. Во-первых, при конусной шахте уменьшается вероятность длительного контакта первичных шлаков с огнеупорной кладкой, что способствует ее сохранности. Первичный шлаковый расплав характеризуется повышенным содержанием в нем монооксида железа (FeO), который обладает большой агрессивностью к шамотной кладке, разъедая ее из-за образования силиката железа – фаялита. Вследствие повышенного содержания FeO первичный

шлак имеет высокую плотность и при конусной шахте при движении шлака вниз исключается длительный контакт шлака с кладкой печи. Во-вторых, расширение шахты вниз и заплечиков вверх дает возможность направлять газовый поток, содержащий восстановители, через рудный гребень, что улучшает восстановительную работу газового потока в печи. Однако чрезмерное расширение шахты, т. е. когда отношение d_k/D необоснованно снижается, вызывает перераспределение шихтовых материалов в доменной печи. Это связано с оттеснением кокса более тяжелыми железорудными материалами к стенкам печи – появляется так называемая «коксовая запазуха». В этом случае рудная нагрузка (отношение массы рудных материалов к массе кокса) у стен печи снижается, что при периферийном подводе дутья и сосредоточении большого количества кокса у стен печи приводит к неуправляемому периферийному газовому потоку с резким снижением восстановительной и тепловой работы газа. Кроме того, при малом значении d_k/D уменьшается диаметр колошника, что вызывает возрастание скорости движения газа в верхней части печи, и колошник становится местом частых верхних подвисаний шихтовых материалов.

Рекомендация М. А. Павлова по численному значению отношения d_k/D составляла в среднем 0,54. Для современных доменных печей это отношение находится в пределах 0,65–0,71, увеличиваясь с ростом полезного объема доменных печей. Угол наклона стен шахты находится обычно в пределах 83–85°. С ростом полезного объема имеется тенденция к снижению угла наклона стен шахты.

Для доменной печи № 2 «ЧусМЗ» отношение d_k/D составляет 0,71, а угол наклона стен шахты равен 85°25'34". Это соответствует рекомендуемым значениям этих параметров для печей такого объема.

Третье отношение, определяющее профиль печи, рассчитываемый по методу М. А. Павлова, – это отношение диаметра распара к диаметру горна (D/d_r). С этой величиной связан угол наклона стен заплечиков (α_3). Сужение печи ниже распара вызвано стремлением разместить фурменные очаги в зоны, в которых

проходит основная масса рудных материалов. В этом случае газовый поток направляется в рудный гребень. Этому способствует также разрыхление шихтовых материалов над зонами горения. Нельзя, чтобы отношение D/d_r приближалось к единице. В 50-е годы XX века на основе проведенных лабораторных исследований было установлено, что наличие заплечиков существенно снижает вертикальное давление шихты на лещады. Поскольку считалось, что вертикальная составляющая массы шихты в печи определяет степень форсировки доменной плавки дутьем, то был выдвинут лозунг: «Долой заплечики!». На одной из доменных печей Урала этот лозунг был реализован. Однако показатели плавки доменной печи без заплечиков были крайне низкими. Вследствие сосредоточения кокса около стен печи и приближения фурменных очагов к огнеупорной кладке на печи наблюдался неуправляемый периферийный газовый поток с низким использованием тепловой и восстановительной способности газа, высоким значением степени прямого восстановления оксидов железа и удельным расходом кокса.

Увеличение значения D/d_r сопровождается сужением диаметра горна. Поскольку в фурменной зоне наблюдается максимальная температура газового потока и большой объем горновых газов, то сужение горна печи приводит к нижним подвисяниям шихты.

Вследствие указанного отношение D/d_r принимается равным 1,1–1,3 (в мировой практике); для доменных печей России это отношение меняется в меньших пределах – от 1,10 до 1,15.

Угол наклона стен заплечиков составляет $79\text{--}83^\circ$. С ростом полезного объема печей наблюдается четкая тенденция к уменьшению угла наклона стен заплечиков.

Доменная печь № 2 Чусовского металлургического завода имеет отношение $D/d_r = 1,14$, а угол наклона стен заплечиков составляет $80^\circ 32' 17''$. Эти значения соответствуют рекомендуемым величинам.

Расстояние от уровня чугунной летки до уровня воздушных фурм должно быть достаточным для вмещения накапливающихся между выпусками чугуна и шлака. При этом следует иметь в виду, что жидкие расплавы в горне печи заполняют не весь объем печи, а только объем межкусковых пространств коксовой насадки. Рядом исследований показано, что порозность (объем межкусковых пространств в единице объема) кокса в горне печи составляет $0,35\text{--}0,37 \text{ м}^3/\text{м}^3$.

К примеру, при суточной производительности доменной печи № 2 «ЧусМЗ» 1395 тонн, удельном выходе шлака $0,420 \text{ т/т}$ чугуна и при 12 выпусках чугуна в сутки при отсутствии отработки верхнего шлака за время между очередными выпусками в горне печи скапливается:

чугуна – 116,2 т,

шлака – 48,8 т.

Принимая плотность чугуна равной $6,9 \text{ т/м}^3$, а шлака – $2,6 \text{ т/м}^3$, в объемном измерении это составит:

чугуна – $16,8 \text{ м}^3$,

шлака – $18,8 \text{ м}^3$.

При диаметре горна печи, равном 7,2 м, площадь его поперечного сечения составляет $40,72 \text{ м}^2$. В этом случае высота чугуна и шлака, образующихся в печи между выпусками, составит:

$$h_{\text{чуг}} = \frac{16,8}{40,72} = 0,41 \text{ м},$$

$$h_{\text{шл}} = \frac{18,8}{40,72} = 0,46 \text{ м}.$$

Поскольку горн печи заполнен кусками кокса и расплавы заполняют только межкусковые пространства коксовой насадки, то при порозности слоя кокса в горне печи, равной $0,35 \text{ м}^3/\text{м}^3$, высота слоя чугуна будет

$$h_{\text{чуг}} = \frac{0,41}{0,35} = 1,17 \text{ м},$$

а шлака

$$h_{\text{шл}} = \frac{0,46}{0,35} = 1,31 \text{ м.}$$

Таким образом, высота расплавов чугуна и шлака в горне печи составляет

$$h_p = 1,17 + 1,31 = 2,48 \text{ м.}$$

При выборе высоты горна доменной печи необходимо учитывать следующие обстоятельства. Уровень шлака не должен близко подходить к уровню воздушных фурм по двум причинам. Одна из них состоит в том, что при приближении шлака к воздушным фурмам возрастает вероятность их заливки в период осадок и неровного схода шихты, а также при непредвиденном обрыве гарнисажа. Кроме того, при приближении уровня шлака к уровню воздушных фурм появляется возможность всплытия кусков кокса в фурменный очаг снизу. Это будет сопровождаться снижением скорости опускания шихты в печи (при том же расходе дутья), возрастанием температуры шихты и газа (из-за изменения теплообменных процессов), увеличением нижнего перепада давления газа. В последующем (при выпуске чугуна из печи) эти параметры начнут изменяться в противоположном направлении. Таким образом, периодичность выпуска расплавов из печи сопровождается в данном случае нестабильностью в сходе шихты, в теплообменных и газодинамических процессах. Для того чтобы уменьшить нестационарность доменного процесса, связанную с периодичностью выпуска продуктов плавки, необходимо исключить близкий подход шлака к уровню воздушных фурм и не доводить расплав шлака до этого уровня ориентировочно на 0,4–0,5 м. Наконец, из-за конструктивных особенностей фурменного прибора верхняя кромка горна печи должна быть выше уровня воздушных фурм примерно на 0,5 м.

Таким образом, высота горна печи объемом 1033 м^3 при осуществлении 12 выпусков чугуна в сутки должна составлять

$$h_r = 2,48 + 0,4 + 0,5 = 3,38 \text{ м.}$$

При выборе высоты горна печи следует принимать во внимание, что малое значение h_r сопровождается неизбежным ростом количества выпусков; это увеличивает также трудозатраты на горновые операции, приводит к снижению высоты слоя шлака в горне печи и ухудшению вследствие этого процессов десульфурации чугуна.

Как видно из табл. 1.3, высота горна доменной печи № 2 «ЧусМЗ» составляет 3,2 м, что достаточно хорошо согласуется с данными приведенного выше расчета.

Что касается высоты зумпфа («мертвого слоя» – $h_{м.с}$), то раньше ее делали равной 0,3–0,5 м. Однако практика показала, что уже в первые месяцы после задувки печи имеет место разгар огнеупорной кладки лещади на глубину до 2,0 метров и более. Поэтому в настоящее время высоту зумпфа для печей среднего и большого объема делают равной 1,10–1,75 м. Доменная печь № 2 «ЧусМЗ» была построена с высотой $h_{м.с} = 0,69$ м.

Высоту распара и заплечиков следует делать такой, чтобы зона первичного шлакообразования, связанная с появлением в слое вязких, пластичных масс, затрудняющих движение газового потока, приходилась на самую широкую часть доменной печи – распар. Для обоснованного выбора высоты распара и заплечиков нужен сложный теплотехнический расчет по определению температурного горизонта в печи, на котором из проплавливаемых железорудных материалов происходит образование вначале первичных, а затем промежуточных и конечных шлаков. К сожалению, таких инженерных методик в настоящее время нет.

Опыт показывает, что положение зоны шлакообразования как в больших, так и в малых печах отличается мало. Положение зоны первичного шлакообразования может изменяться в зависимости от хода печи, состава шихты, технологии ведения плавки, поэтому высоту распара рассчитать невозможно и он делается высотой 1,2–2,0 м. Сказанное относится и к высоте заплечиков – в прак-

тике эта высота меняется от 2,5 (для печей малого объема) до 3,5 м для печей объемом 3200–5500 м³.

Высота распара доменной печи № 2 «ЧусМЗ» составляла 2,0 м, а заплечики имели высоту 3,0 м.

Ранее говорилось о том, что основное назначение колошника доменной печи состоит в направленном распределении загружаемых шихтовых материалов. Установление требуемой высоты колошника представляет сложную задачу. Для того чтобы имела возможность направленного распределения шихты, на колошнике необходимо вместить две-три подачи. Величина коксовой подачи определяется прежде всего полезным объемом доменной печи и может быть определена из следующего эмпирического уравнения:

$$V_{\text{к.п}} = 0,063 \cdot V_0^{0,708} - 0,071 \cdot V_0^{0,727}, \quad (1.4)$$

где $V_{\text{к.п}}$ – объем кокса в подаче, м³;

V_0 – полезный объем печи, м³.

Согласно этому уравнению для доменной печи № 2 «ЧусМЗ» полезным объемом 1033 м³ минимальное и максимальное значение объема коксовой подачи составляет 8,6 и 11,0 м³.

При диаметре колошника печи, равном 5,8 м, его сечение составляет 26,42 м². Если на печи установлена рудная нагрузка 3,6 т/т, то объем железорудного материала (при значении $V_{\text{к.п}} = 9 \text{ м}^3$) в подаче

$$V_{\text{жрм.п}} = \frac{9 \cdot 3,6 \cdot 0,5}{1,7} = 9,5 \text{ м}^3,$$

где 0,5 и 1,7 – насыпные массы кокса и железорудного материала, т/м³.

Тогда высота трех подач будет

$$h_{\text{под}} = 3 \cdot \left(\frac{9}{26,42} + \frac{9,5}{26,42} \right) = 2,1 \text{ м.}$$

Для того чтобы рассчитать высоту цилиндрической части колошника, необходимо учесть так называемый «уровень засыпи» ($h_{\text{зас}}$) – расстояние от кромки большого конуса в опущенном состоянии до уровня шихты на колошнике.

Уровень засыпи на колошнике доменной печи № 2 «ЧусМЗ» поддерживался равным 1,0–1,2 м.

В этом случае расчетная высота цилиндрической части колошника должна составлять

$$h_{\text{к}}^{\text{расчет}} = 2,1 + 1,1 = 3,2 \text{ м.}$$

Значение высоты колошника доменной печи № 2 «ЧусМЗ» равно 2,8 м. В случае выполнения приведенных выше расчетов на вмещение в цилиндрической части колошника двух подач, расчетное значение высоты колошника будет соответствовать установленному.

Решая вопрос о выборе необходимых параметров колошника, нужно иметь в виду, что этот размер связан с разностью диаметров колошника и большого конуса – с зазором:

$$\Delta = (d_{\text{к}} - d_{\text{бк}}) / 2, \quad (1.5)$$

где $d_{\text{к}}$ – диаметр колошника печи, м;

$d_{\text{бк}}$ – диаметр большого конуса, м.

Обычно этот зазор делается равным 0,7–1,2 м. Малым данный зазор делать нельзя, так как в этом случае из-за роста скорости движения газа в зазоре увеличивается вынос пыли. При большом зазоре высоту колошника приходится увеличивать для того, чтобы осуществлять встречу ссыпающихся материалов с цилиндрической частью колошника.

1.3. Некоторые вопросы рационального профилирования доменной печи

Очертание рабочего пространства печи, особенно ее нижней части, в значительной степени определяется закономерностями движения шихтовых материалов.

Согласно существующим взглядам на механику движения сыпучих тел (к которым относится кокс), над выпускными отверстиями (фурменными оча-

гами) формируется квазитор разрыхления, образуемый эллипсоидами разрыхления над зонами горения. Высота квазитора определяется из уравнения

$$H = \sqrt{\frac{n \cdot r^{3/2}}{\pi \cdot R} \cdot \left(\frac{W_0}{W_{\text{ш}}}\right)^{3/2} \cdot \frac{1}{1 - \varepsilon}}, \quad (1.6)$$

где n – число фурменных очагов, шт.;

r – радиус окружности, эквивалентный по площади проекции очага горения на горизонтальную площадь, м;

R – радиус квазитора (расстояние от оси печи до длинной оси эллипсоидов), м;

W_0 – скорость выхода кокса в очагах горения, м/с;

$W_{\text{ш}}$ – скорость движения шихты в районе вершины квазитора, м/с;

ε – эксцентриситет эллипсоида разрыхления.

Безусловно, что очертание заплечиков и распара должно вписывать квазитор разрыхления в профиль печи. В том случае, когда, к примеру, угол заплечиков выполнен пологим, между зоной движущегося потока шихты и стенкой печи появляются участки неподвижного слоя шихты – создаются предпосылки для образования настывей. Напротив, если огнеупорная кладка печи «режет» квазитор разрыхления, то зона материалов с повышенной порозностью приближается к стенке печи, провоцируя периферийное движение газа, разгар кладки и горение холодильников.

Уравнение (1.6) предполагает определение скоростей движения шихты в вершине квазитора и при входе кусков кокса в фурменные очаги.

Применительно к доменной печи № 2 «ЧусМЗ» при удельном расходе кокса $k = 0,520$ т/т и суточной производительности $P = 1395$ т/сут минутный объем кокса, сжигаемый в печи, составит

$$V_{\kappa} = \frac{k \cdot P}{\gamma_{\text{н}}^{\kappa} \cdot 1440}, \quad (1.7)$$

где $\gamma_{\text{н}}^{\kappa}$ – насыпная масса кокса, т/м³.

Тогда
$$V_{\kappa} = \frac{0,52 \cdot 1395}{0,5 \cdot 1440} = 1,0 \text{ м}^3/\text{мин.}$$

При диаметре распара печи, равном 8,2 м, скорость движения кусков кокса в районе распара и низа шахты, где предположительно располагается вершина квазиторазрыхления,

$$W_{\text{ш}} = \frac{1,0 \cdot 4}{\pi \cdot 8,2^2} = 0,0189 \text{ м/мин.}$$

Скорость входа кусков кокса в фурменные очаги при числе фурм $n = 14$ и диаметре зоны горения $L_{\text{ок}} = 1,17$ м (определена позже) составляет

$$W_0 = \frac{1,0 \cdot 4}{14 \cdot \pi \cdot 1,17^2} = 0,0664 \text{ м/мин.}$$

При эксцентриситете эллипсоида разрыхления $\varepsilon = 0,85$ (взято среднее, рекомендованное В. К. Грузиновым) высота квазиторазрыхления

$$H = \sqrt{\frac{14 \cdot (1,17/2)^{3/2}}{\pi \cdot 2,72} \cdot \left(\frac{0,0664}{0,0189}\right)^{3/2} \cdot \frac{1}{(1-0,85)}} = 5,67 \text{ м.}$$

Малая ось эллипсоида разрыхления определится из уравнения

$$B = H \cdot \sqrt{1 - \varepsilon^2}, \quad (1.8)$$

$$B = 5,67 \cdot \sqrt{1 - 0,85^2} \cong 3 \text{ м.}$$

На рис. 1.9 показаны профиль доменной печи № 2 «ЧусМЗ» и вписанный в ее нижнюю часть квазиторазрыхления. Из рисунка видно, что он достаточно хорошо согласуется с конфигурацией нижней зоны печи – в первую очередь с углом наклона заплечиков и высотой. Для полного согласования квазиторазрыхления и профиля печи объемом 1033 м^3 целесообразно несколько увеличить диаметр распара – до 8,3 м (вместо 8,2 м по проекту) и несколько уменьшить угол наклона заплечиков – до $79^\circ 40'$.

По мнению В. К. Грузинова, желательно совмещение гребня материалов на колошнике печи с большой осью квазиторазрыхления. В этом случае происходит загрузка мелких фракций шихты на вертикаль зоны разрыхленных ма-

териалов, что улучшает газодинамические характеристики столба шихты в печи. Кроме того, газ направляется в участки большей концентрации рудных материалов, улучшая степень использования восстановителей.

Для выбора параметров колошника с учетом закономерностей ссыпания шихты и ее формирования в верхней части печи необходимо иметь в виду следующее. В том случае, когда ссыпающиеся с конуса материалы ударяются в верхнюю часть броневого защиты, после неупругого удара шихта ссыпается вдоль броневых плит, что приводит к формированию гребня в периферийном кольце. Из-за сосредоточения мелких фракций шихты в этой зоне следует ожидать тугой ход печи; невозможной становится организация усиленного газового потока в периферийной зоне.

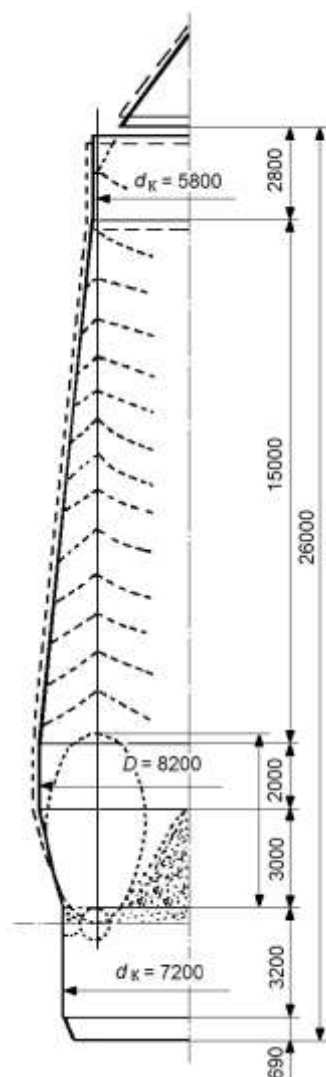


Рис. 1.9. Профиль печи № 2 Чусовского металлургического завода объемом 1033 м^3 с вписанным в него квазитормом разрыхления

Напротив, если в пределах цилиндрической части колошника встречи ссыпающихся с большого конуса материалов с бронеовой защитой не происходит, то организуется неуправляемый периферийный газовый поток со всеми вытекающими от этого последствиями.

Таким образом, для реализации высказанного соображения необходим расчет траектории падения кусков шихты в рабочем пространстве колошника печи.

Из имеющихся методик по определению траекторий падения шихтовых материалов с конуса наиболее приемлемой следует считать методику В. К. Грузинова, поскольку в ней учитываются как свойства шихты, так и свойства газа.

Смещение куска шихты в вертикальном направлении за определенный промежуток времени определяется из следующего уравнения [2]:

$$S_B = \frac{(W_{\Pi} - W_{\Gamma})^2}{g} \cdot \ln \frac{(W_{\Pi} - W_{\Gamma} - W_H^B) + (W_{\Pi} - W_{\Gamma} + W_H^B) \cdot e^{\frac{2gr}{(W_{\Pi} - W_{\Gamma})}}}{2 \cdot (W_{\Pi} - W_{\Gamma})} - (W_{\Pi} - W_{\Gamma}) \cdot \tau. \quad (1.9)$$

Смещение куска шихты в горизонтальном направлении за промежуток времени можно найти из выражения

$$S_{\Gamma} = [2,2147 \cdot \sqrt{d_{\text{кон}} \cdot (\operatorname{tg} \alpha - f) \cdot \cos \alpha}] \cdot \tau. \quad (1.10)$$

Здесь S_B , S_{Γ} – смещение куска шихты соответственно в вертикальном и горизонтальном направлении, м;

W_{Π} – предельная скорость падения куска шихты, м/с;

W_{Γ} – скорость движения газа в зазоре между стенками колошника и большим конусом, м/с;

W_H^B – вертикальная составляющая скорости схода куска шихты с большого конуса, м/с;

$d_{\text{кон}}$ – диаметр большого конуса, м;

α – угол наклона образующей большого конуса, град;

f – коэффициент трения кусков шихты о поверхность большого конуса (для кокса может быть принят равным 0,33; для кусков агломерата – 0,47; для окатышей – 0,24).

Предельная скорость падения кусков шихты рассчитывается по уравнению

$$W_{\Pi} = c \cdot \sqrt{\frac{d_{\kappa} \cdot \rho_{\kappa}}{\rho_{\Gamma}}}, \quad (1.11)$$

где c – коэффициент (равен 5,4 при падении окатышей и 3,5 при падении куска агломерата и кокса);

d_{κ} – эквивалентный диаметр куска шихты, м;

$\rho_{\kappa}, \rho_{\Gamma}$ – плотность куска шихты и газа соответственно, кг/м^3 .

При составе колошникового газа: $\text{CO}_2 = 19,7 \%$, $\text{CO} = 22,8 \%$, $\text{H}_2 = 5,2 \%$, $\text{N}_2 = 52,3 \%$, давлении колошникового газа $P_{\kappa} = 0,83$ ати и его температуре, равной 149°C , плотность газа при действительных параметрах колошникового газа составляет $1,5 \text{ кг/м}^3$. При плотности кокса 880 кг/м^3 , агломерата – 3500 кг/м^3 и окатышей – 3800 кг/м^3 расчетные значения предельных скоростей соответственно составили: кокс – $16,74 \text{ м/с}$, агломерат – $14,93 \text{ м/с}$, окатыши – $28,25 \text{ м/с}$.

Значение вертикальной составляющей скорости схода куска шихты с большого конуса рассчитывается следующим образом:

$$W_{\text{H}}^{\text{B}} = 2,2147 \cdot \sqrt{d_{\text{кон}} \cdot (\text{tg} \alpha - f) \cdot \sin \alpha}. \quad (1.12)$$

При диаметре большого конуса на доменной печи № 2 «ЧусМЗ», равном $4,2 \text{ м}$, угле наклона образующей конуса 55° и отмеченных ранее коэффициентах трения различных компонентов шихты о поверхность конуса, предполагая, что движение отдельных кусков шихты происходит с половины образующей конуса, численные значения вертикальной скорости схода шихты с конуса получаются равными: для кокса – $3,9 \text{ м/с}$, для кусков агломерата – $3,64 \text{ м/с}$, для окатышей – $4,05 \text{ м/с}$.

Скорость движения газа в зазоре между стенками колошника и конусом определяется из уравнения

$$W_{\Gamma} = \frac{V_{\text{д}} \cdot N_2^{\text{д}} \cdot (t_{\kappa\Gamma} + 273)}{12900 \cdot N_2^{\kappa\Gamma} \cdot (1 + P_{\kappa\Gamma}) \cdot (d_{\kappa}^2 - d_{\text{кон}}^2) \cdot \epsilon}, \quad (1.13)$$

где $V_{\text{д}}$ – расход дутья, подаваемого в печь, $\text{м}^3/\text{мин}$;

$N_2^д, N_2^{к.г}$ – содержание азота соответственно в дутье и в колошниковом газе, % (об.);

$t_{к.г}$ – температура колошникового газа, °С;

$P_{к.г}$ – избыточное давление колошникового газа, ати;

$d_к, d_{к.он}$ – соответственно диаметр колошника печи и диаметр большого конуса, м.

При минутном расходе дутья, равном 1224 м³/мин, расчетная скорость движения газа в зазоре между стенками колошника и большим конусом составляет 4,01 м/с.

Рассчитав все параметры, определяющие смещение кусков в вертикальном и горизонтальном направлении, задавая значения времени падения (0,1–1,0 с), можно построить траекторию падения кусков шихты с конуса при загрузке материалов в печь (рис. 1.10).

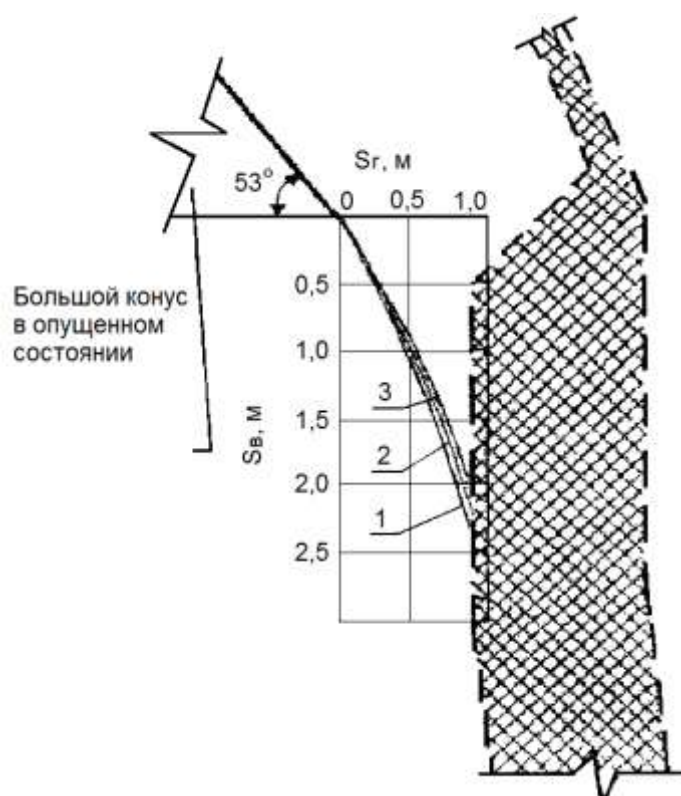


Рис. 1.10. Траектория падения окатышей (1), кусков агломерата (2) и кокса (3) с большого конуса ДП № 2 «ЧусМЗ» при загрузке материала в печь [2]

Полученные расчетные данные показывают, что при уровне засыпи 1,0 м гребень ссыпающейся шихты располагается примерно на расстоянии 300 мм от стенки колошника. При установлении уровня засыпи более 1,6 м гребень шихтовых материалов будет находиться около стенок колошника, и возможность регулировки газораспределением путем изменения уровня засыпи становится проблематичной.

Таким образом, высота и диаметр колошника доменной печи № 2 «ЧусМЗ» позволяют осуществлять эффективное регулирование газораспределения в печи и совмещать гребень материалов с большой осью квазитора разрыхления.

Методика расчета траектории падения кусков шихты в печь с лотка бесконусного загрузочного устройства приведена в [2].

2. КОНСТРУКЦИЯ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

2.1. Фундамент

Назначение фундамента – передать нагрузку от доменной печи и находящегося на ней оборудования на грунт с допустимым удельным давлением.

Доменная печь – это уникальное сооружение, отличающееся большой массой. Принято считать, что масса 1 м³ полезного объема печи вместе с загруженной в нее шихтой, кожухом, огнеупорной кладкой, установленными холодильниками составляет 12–15 т. Таким образом, масса доменной печи полезным объемом 1033 м³ может достигать 15000 т. Эту нагрузку необходимо передать на грунт с определенным удельным давлением, которое составляет для скальных грунтов 10,6 кг/см², на щебень – 6,4 кг/см², на дресву – 2–4 кг/см², на наносные грунты – не более 2–2,5 кг/см². При слабом грунте фундамент опирают на свайное основание. Так, если печь полезным объемом 1033 м³ опирается на скальный грунт, то площадь основания фундамента должна составлять

$$F = (15000 \cdot 1000) / 10,6 = 1415100 \text{ см}^2 = 142 \text{ м}^2.$$

Если принять форму фундамента в плане круглой, то диаметр основания фундамента будет равен 13,5 м.

Полная методика расчета конструкции фундамента для доменной печи приведена в [3].

Фундамент должен давать минимальную и равномерную осадку. Большая и тем более неравномерная осадка может привести к появлению трещин как в самом фундаменте, так и в лещади. При образовании таких трещин может произойти одна из самых тяжелых аварий в доменном производстве – прорыв горна. Осадка нарушает сопряжение агрегатов для подъема шихты на колошник (наклонного моста или ленточного транспортера) с верхом печи и центровку засыпного аппарата. Отклонение оси засыпного аппарата от оси печи отражается на равномерности распределения материалов, ровности хода печи и создает условия для искажения ее профиля.

Осадка фундамента не должна превышать 100 мм, а в некоторых случаях ее оговаривают 20–30 мм. Неравномерность осадки не должна превышать 0,001, т. е. допустимый перекося на 1 метр длины фундамента – не более 1 мм.

При строительстве печи необходимо иметь в виду ряд особенностей доменного процесса, которые нужно учитывать при разработке конструкции фундамента. Так, к примеру, в металлоприемнике доменной печи объемом 1033 м³ между смежными выпусками скапливается до 170–200 т чугуна и шлака, нагретых до 1400–1500 °С. Из-за наличия зумпфа и неизбежного разгара кладки лещади ниже оси летки находится жидкий чугун, который нельзя выпустить через чугунную летку. Масса этого чугуна может достигать 1000 т и более. Безусловно, что наличие таких масс расплавов в непосредственной близости от фундамента предъявляет к нему особые требования по термостойкости.

Увеличение температуры фундамента приводит к постепенному разрушению бетона, так как гидроалюминат и гидроксид кальция, образующиеся при гидратации цемента, при высокой температуре теряют гидратную влагу. Выделяющийся при этом оксид кальция гасится влагой воздуха с увеличением объема фазы. Кроме того, разница коэффициентов линейного расширения цементного камня и заполнителя приводит к возникновению термических напряжений. Наличие фазовых и термических напряжений приводит к образованию трещин и постепенному разрушению фундамента.

В качестве заполнителя при изготовлении фундамента нельзя использовать кварцевые материалы и известняк – один из этих материалов (кварц) при нагреве испытывает ряд модификационных переходов с изменением объема, второй (известняк) при воздействии высоких температур разлагается, а затем может гаситься водой и разрушаться.

Фундамент печи состоит из двух частей (рис. 2.1): подземной – подошва фундамента 1 и верхней части – пень 2. Подошва фундамента выполняется из бетона марок не ниже 400. В качестве заполнителя лучше использовать горные вулканические породы, например гравий. Консольные части подошвы, которые

могут работать на изгиб, армируются железом, поскольку бетон хорошо работает на сжатие и не работает на растяжение. При возникновении изгибающих моментов верхняя часть консольной части может испытывать сжимающие, а нижняя часть – растягивающие усилия, что может вызвать разрушение монолитной подошвы.

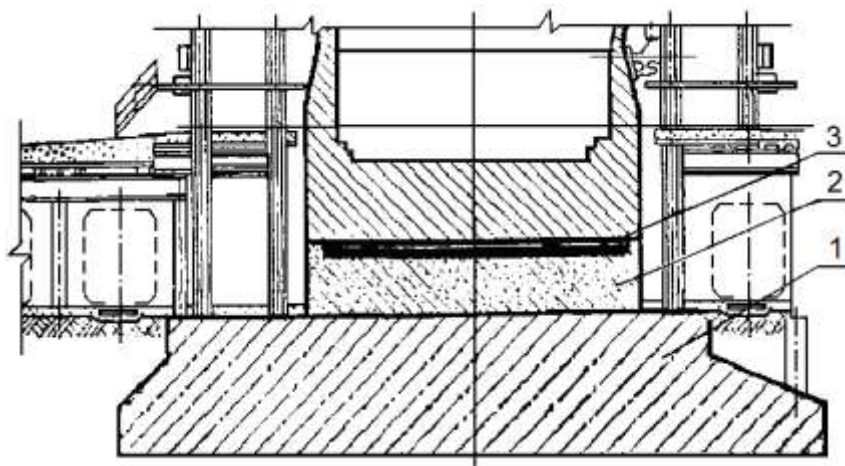


Рис. 2.1. Фундамент доменной печи:
1 – подошва фундамента; 2 – пень; 3 – трубы воздушного охлаждения

Нижняя часть подошвы должна быть заглублена на 400–500 мм ниже глубины промерзания грунта в заданном районе. При нарушении этого условия при замерзании грунта имеет место его вспучивание, что может вызвать напряжение в подошве и ее растрескивание. В условиях Урала глубина промерзания на открытых участках может достигать 2,5–3,0 метров.

Верхняя часть фундамента – пень – играет две роли. Во-первых, пень ограждает подошву от воздействия высоких температур металлоприемника, а во-вторых, пень должен приподнять уровень чугунной летки на такую высоту, чтобы имелась возможность слива чугуна и шлака в чугуновозные и шлаковозные ковши. Уровень крайнего сливного носка для чугуна должен быть поднят относительно головки рельсов не менее чем на 4,7 м (железнодорожный габарит).

Пень выполняется из огнеупорных материалов, поскольку работает при более высоких температурах, чем подошва фундамента. Пень печи заключается в цилиндрический кожух. Далее выполняется стакан из шамотного огнеупора

толщиной 345 мм (полуторный огнеупор). Между стаканом и кожухом обязательно делается компенсационный зазор толщиной 100 мм, заполняемый углеродистой массой. Внутренний объем стакана заполняется огнеупорным бетоном, который имеет огнеупорность 1400–1500 °С и начало деформации под нагрузкой 2 кг/см² при температуре 1200–1300 °С. Огнеупорный бетон состоит из следующих компонентов: цемент – 16,7 %, шамотный порошок – 16,7 %, песок шамотного боя мельче 5 мм – 27,8 %, щебень из шамотного кирпича размером 5–40 мм – 38,8 %. К этой смеси добавляется вода. В некоторых случаях периферийная часть залитой огнеупорной массы армируется железом. После изготовления фундамента поверхность пня тщательно разглаживается и сверху устанавливается арматура охлаждения лещади.

Применяемое в настоящее время охлаждение днища лещади воздухом или водой принципиально решает вопрос защиты фундамента от термического разрушения.

Попадание воды на фундамент и ее скопление вблизи фундамента не допускается [4]. С этой целью вокруг фундамента располагают водосборные желоба.

За состоянием фундамента ведут систематическое наблюдение как визуально, так и с помощью заложенных в него термодатчиков. При появлении глубоких трещин производят их заполнение огнеупорным раствором. При капитальных ремонтах первого разряда после удаления кладки лещади бетон фундамента проверяют на степень дегидратации заливкой поверхности пня водой. Размягчающуюся после полива часть фундамента удаляют и вновь бетонируют.

2.2. Кожух печи

Кожух доменной печи воспринимает внутреннее давление газов, шихты и кладки, создает герметичность печи и является одной из самых ответственных ее конструкций. Любое местное разрушение кожуха или его перегрев нарушает нормальный режим работы печи и приводит к аварийным остановкам.

Прочность и способность кожуха противостоять деформациям рассчитывается с учетом веса шихты и происходящих с ней преобразований, а также нагрузки крепящихся к нему различных сооружений и устройств.

В современном исполнении кожух представляет собой сварную конструкцию, состоящую из конических и цилиндрических поясов – царг, изготовленных из карт (листов) низколегированных, нормализованных марок листовой стали: 09Г2С, 09Г2МФБ, 06Г2МФБ, 10Г2С1, 14Г2АФ, 16Г2АФ, 15ХСРД и др., характеризующихся высокой ударной вязкостью, большой прочностью, достаточной пластичностью и термостойкостью. Сталь улучшается электрошлаковым переплавом.

На рис. 2.2 и 2.3 показана развертка кожуха доменной печи № 2 ОАО «ЧусМЗ» с полезным объемом 1033 м^3 с показом царг, карт и плитовых холодильников. На рис. 2.4 представлена развертка кожуха ДП №5 ОАО «ЕВРАЗ-НТМК» объемом 2200 м^3 .

Толщина кожуха делается разной по высоте печи. Так, одна из крупнейших печей мира объемом 5580 м^3 (ОАО «Северсталь») имеет толщину кожуха лещади, горна, заплечиков, распара и охлаждаемой части шахты 60 мм, в остальных участках – 40–50 мм. Толщина самонесущего кожуха доменной печи № 5 ОАО «ЕВРАЗ-НТМК» составляет 45–60 мм (карты в области горна).

На некоторых зарубежных предприятиях кожух печи выполняют цельносварным из котельной стали и стали других марок. Толщина у основания 60 мм, на колошнике – 30 мм. В Японии предложено сооружать кожух шахты, распара и заплечиков в виде единой цельнометаллической конструкции при одинаковой толщине кладки с приваркой опорного кольца к кожуху печи для передачи нагрузки на колонны.

В процессе эксплуатации кожух печи испытывает различные напряжения. Кроме растягивающих кольцевых (горизонтальных) усилий от давления шихты, газов и термического расширения кладки в радиальном направлении, на кожух действуют и вертикальные (меридиональные) напряжения [5].

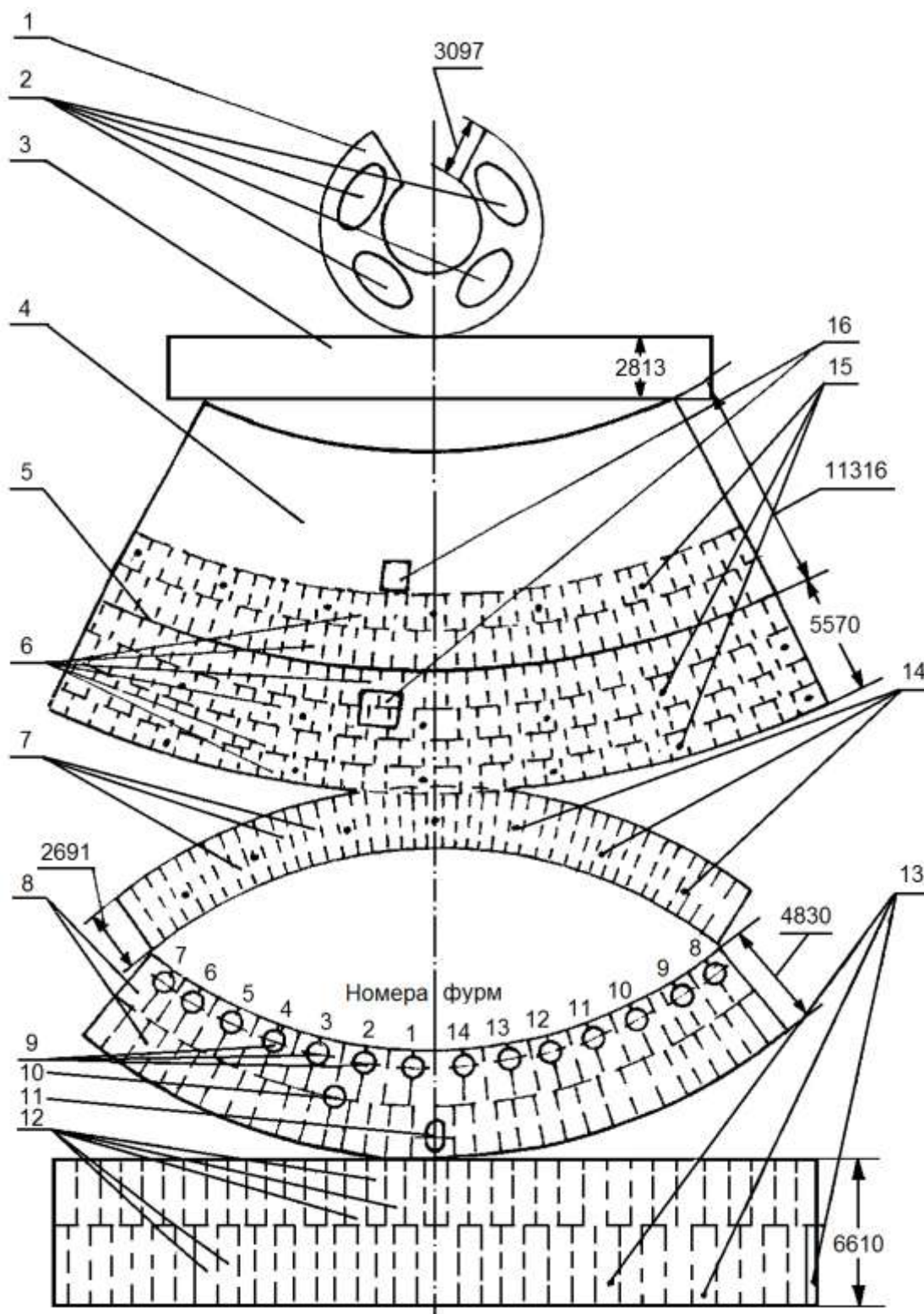


Рис. 2.3. Развертка кожуха доменной печи № 2 ОАО «ЧусМЗ» с полезным объемом 1033 м³:

1 – купол; 2 – места врезки газоотводов; 3 – колошник; 4 – шахта печи; 5 – перелом кожуха шахты; 6 – холодильники шахты; 7 – холодильники заплечиков; 8 – холодильники фурменной зоны; 9 – врезка фурменных приборов; 10 – врезка шлаковой летки; 11 – врезка чугунной летки; 12 – холодильники горна; 13 – отверстия для монтажа термопар лещади; 14 – отверстия для монтажа термопар заплечиков; 15 – отверстия для монтажа термопар шахты; 16 – ремонтные люки

Рис. 2.4. Условная развертка кожуха ДП № 5 ОАО «ЕВРАЗ-НТМК» (вид изнутри) с указанием горизонтальных и вертикальных размеров

В кожухе лещади печи зафиксированы растягивающие меридиональные нагрузки 100–125 МПа, а под чугунной леткой эти нагрузки превышают 300 МПа. Возможны случаи резкого повышения растягивающих кольцевых напряжений, достигающих до 430 МПа. Кольцевые растягивающие напряжения в конической части фурменной зоны над чугунной леткой достигают до 125 МПа. В кожухе стен горна растягивающие кольцевые усилия достигают предела текучести металла.

На величину напряжений влияет конструкция кожуха. В случае выполнения конической формы кожуха в нижней части печи (в местах стыка конструктивных переломов) возникают напряжения до 525 МПа от изгибающих моментов. Высокие напряжения возникают также в местах стыков вертикальных плитовых холодильников и в местах с малыми зазорами между кладкой и холодильниками.

Напряженность металла в кожухе печи возрастает в местах вырезов для установки воздушных фурм, шлаковых и чугунных леток. Места врезок указанных устройств должны усиливаться накладками, а для усиления кожуха чугунная летка оформляется специальной рамой [6]. Вырезы для холодильников шахты должны быть минимальными по числу и площади и не иметь острых углов.

Дополнительные напряжения в кожухе могут быть вызваны дефектами, связанными с качеством монтажа, а также нарушением нормального режима эксплуатации печи (табл. 2.1).

Таблица 2.1

Дополнительный уровень напряжений, вызванный некоторыми дефектами и нарушением правил эксплуатации [7]

Дефект конструкции или воздействие на нее	Дополнительные напряжения, МПа
Депланация листов на стыках до 5 мм	80
Оставление при монтаже футерованных кожухов монтажных скоб и кронштейнов	80–150
Уменьшение компенсационного слоя в футеровке на 20–25 мм	70–80
Местный перегрев кожуха до 300 °С	80
Местный перегрев кожуха до 500–700 °С	150–200

Разнонаправленные меридиональные и кольцевые напряжения, а также неравномерный нагрев кожуха и рост кладки влекут за собой разрывы кожухов.

Анализ нарушения целостности кожуха (образование трещин, выпучивание) показывает, что главным образом они происходят вследствие несоблюдения технологии производства и правил технической эксплуатации оборудования и конструкций, недостаточной интенсивности охлаждения, низкой стойкости холодильников, действия паров цинка, нарушения графика планово-предупредительных ремонтов, неверных проектных решений: малых зазоров между холодильниками, между холодильниками и кожухом печи и между холодильниками и огнеупорной кладкой.

Разрывы (трещины) кожухов не однотипны и связаны со спецификой процессов, происходящих в различных зонах печи (рис. 2.5 [8]).

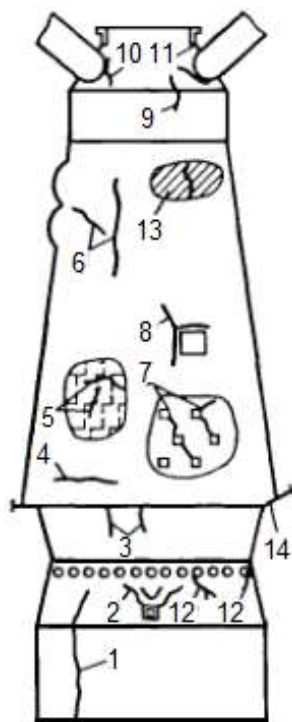


Рис. 2.5. Схема расположения трещин на кожухе печи

Большая часть (до 65–70 %) трещин образуется в кожухе лещади и горна печей. Они могут образовываться в плитах царг 1, 2 и в местах приварки оборудования 12. Трещины в области горна имеют вертикальный характер, идут вверх до фурменных приборов и вниз до лещади. Ширина их раскрытия – до 60–80 мм. Трещины образуются от радиального давления огнеупорной кладки

на холодильники при затвердевании массы в компенсационном зазоре между футеровкой и холодильными плитами. Ветвление этих трещин свидетельствует об охрупчивании металла кожуха. Причиной появления трещин различного направления длиной до 2,0 м в области чугунной летки и в фурменной зоне является высокая цикличность температуры кожуха в зоне летки, а также отсутствие достаточного компенсационного слоя между кладкой и холодильниками. В заплечиках и нижней части шахты причиной образования трещин являются местные перегревы, связанные с выходом из строя холодильников и напряжения, обусловленные недостаточной толщиной компенсационного слоя между футеровкой и кожухом 3, 4, 5, 6. В углах вырезов брони для холодильников и у вставок кожуха 7, 8 могут образовываться разрывы, связанные с некачественным выполнением сварки. На куполе печи трещины возникают в местах при-мыкания газоотводов и колошникового фланца 9, 10, 11 и являются следствием местных перегревов при разрушении теплоизоляционного слоя или значительного повышения температуры колошникового газа. Из-за недостаточной герметичности может происходить выпучивание кожуха 13. От жесткой связи кожуха с кладкой или от недостаточных зазоров между ними могут образовываться трещины в мараторном кольце. Трещины иногда достигают 60–80 мм по ширине и 1,5–2,0 м по длине. Улучшение службы кожухов связано с устранением указанных выше недостатков и с использованием новых, более пригодных для кожухов марок сталей.

В нижней части (под лещастью) кожух печи иногда заканчивается металлическим днищем (донышком), назначение которого сводится к предупреждению фильтрации газов через лещасть и увеличению ее прочности. На печах большого объема для повышения герметичности иногда устанавливают два донышка, при этом верхнее донышко имеет компенсатор температурных расширений.

Цилиндрическая часть колошника сверху закрывается куполом. Кожух купола обычно защищается стальными неохлаждаемыми плитами с залитым

огнеупорным кирпичом. Купол сверху стягивается литым стальным фланцем, который является опорой для засыпного устройства и газоотводов печи. Для примыкания газоотводов в куполе имеются симметричные вырезы круглого или овального сечения. Вырезы усиливают стальными амбразами для придания жесткости.

До разработки методики прочностного расчета оболочки кожуха доменной печи существовал упрощенный подход к определению его толщины на основе только теплового расчета и практических данных. Фактическое напряженно-деформированное состояние футерованного кожуха, вызываемое воздействием отдельных элементов в системе «кожух – холодильники – набойка – кладка», не учитывалось. В 50-х годах прошлого века было принято принципиальное решение для выбора оптимальных параметров системы «кожух – холодильники – набойка – кладка», заключающееся в том, что температурное воздействие от расширяющейся огнеупорной кладки должно погаситься компенсирующим упругим заполнением зазора между кожухом и футеровкой, поскольку в случае их соприкосновения напряжения в кожухе могут достигать предела текучести металла кожуха. Исходя из этого был определен необходимый минимальный зазор, основанный на условиях совместной работы кожуха и футеровки:

$$\Delta z = \frac{\Delta_{\text{кл}} - (\Delta t - \Delta d)}{10^5}, \quad (2.1)$$

где Δz – величина минимального зазора между кожухами и футеровкой;

$\Delta_{\text{кл}}$ – увеличение радиуса кирпичной кладки;

Δt и Δd – увеличение радиуса кожуха от нагрева t и давления d .

В настоящее время в практике проектирования стальных футерованных кожухов доменных печей и воздухонагревателей для расчета напряженно-деформированного состояния используют методику, предложенную «ЦНИИПСК им. Мельникова» [6, 9]. Расчет остаточного ресурса кожухов эксплуатируемых печей наиболее часто проводят по методике, изложенной в [10] и впервые разработанной Л. А. Сорокиным [5].

2.3. Несущие металлоконструкции

Для обеспечения устойчивости и бесперебойной работы доменной печи, имеющей огромный вес, существует несколько типов несущих конструкций.

1. *Шотландский* с опорой колошника через кожух и маратор на основные колонны печи. Для удобства обслуживания фурм и равномерного распределения их по окружности горна число колонн обычно делают кратным числу фурм. Другое сочетание неудобно, так как затрудняет обслуживание фурм и создает неравномерное размещение их по окружности горна.

Существенным недостатком конструкции данного типа является передача вибрации от скипового подъемника и оборудования колошника непосредственно на печь. Кроме того, для проведения ремонтов и реконструкций доменных печей требуется демонтаж колошниковоу устройства или сооружение специальной опорной системы при смене кожуха.

2. *Немецкий* с опорой колошника на четыре самостоятельные колонны. Несмотря на улучшенное обслуживание горна, в этой конструкции не исключено наличие значительных напряжений, так как вес шахты передается полностью на заплечики и горн.

3. *Комбинированный*, в котором уменьшены указанные выше напряжения, но усложнено обслуживание горна. Данный тип конструкции обеспечивает достаточную прочность и работоспособность кожуха печи даже при появлении в нем больших трещин. Это особенно важно для печей, работающих на шихте со значительным содержанием цинка, который создает большие давления на кожух во всех направлениях.

4. *Японский* с шестью колоннами, имеющими кронштейны (применяют на современных печах Японии). Колонны тяжелы из-за эксцентриситета нагрузок. Диаметр кольцевого воздухопровода, расположенного вне колонн, значительно больше, чем в других вариантах. Это увеличивает и утяжеляет детали фурменного устройства. Возможности организации напольного транспорта вокруг горна ограничены.

5. *Американский* с четырьмя колоннами, разработанный в последние годы в США. В этом случае устраняются последствия вибрации, вызываемые грузочными устройствами, и имеется широкий доступ для обслуживания леток и фурм горна.

6. *Самонесущий* кожух шахты без маратора. Эту конструкцию применили на доменных печах полезным объемом 2200, 3200, 5000 и 5500 м³.

На отечественных предприятиях в зависимости от полезного объема и года постройки печи применяются различные типы опорных металлоконструкций.

Рассмотрим, например, шотландский и комбинированный типы с опорой шахты и колошника через опорное кольцо (маратор) на горновые колонны (рис. 2.6). Число колонн на доменных печах с полезным объемом 1513 м³ и 1719 м³ составляет шесть.

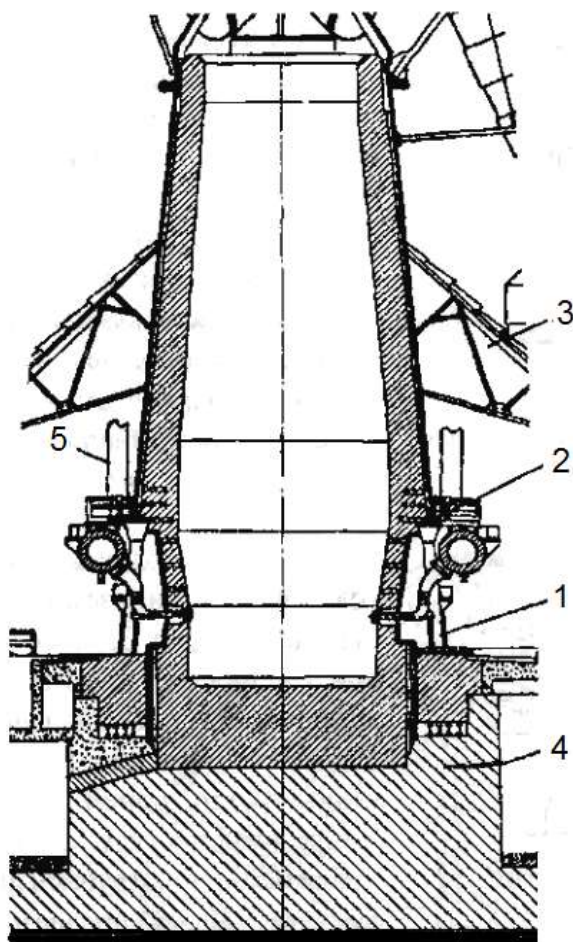


Рис. 2.6. Опора шахты и колошника через маратор на горновые колонны:
1 – колонна горна; 2 – мараторное кольцо; 3 – кровля рабочей площадки;
4 – фундамент печи; 5 – колонны шахты

Колонны горна предназначены для восприятия нагрузок от колонн шахты, кожуха и футеровки шахты. Расстояние между колоннами горна и кожухом печи составляет обычно не менее 500 мм, что необходимо для нормального проведения ремонтов. Колонны ниже рабочей площадки облицовываются шамотным кирпичом или жароупорным бетоном и закрываются стальным кожухом толщиной 4 мм. Усиливается тенденция к использованию только четырех колонн горна.

Колонны горна несут большие нагрузки и должны надежно опираться на пень фундамента. Для этого их закрепляют в фундаменте на отдельных опорах – чугунных литых башмаках или фундаментных кольцах (клепанных, чугунных, литых, в настоящее время – сварных). Иногда колонны связывают с массивом пня специальными фундаментными болтами. Площадь опор зависит от нагрузки на колонны и допускаемого напряжения бетона фундамента. Опоры размещают ниже кладки лещади на 2–3 м для защиты в случае выхода чугуна на горизонте лещади.

Передача давления на колонны со стороны кладки шахты, ее холодильников, частично заплечиков и колошниковоу устройства (в зависимости от типа несущих конструкций) осуществляется через верхнее опорное кольцо – маратор, представляющее собой мощную кольцевую балку. Кольцо состоит из горизонтальных листов и вертикального листа первого пояса (царги) кожуха шахты и соединяется с верхом колонн при помощи болтов через промежуточную опорную плиту. Маратор является основой для огнеупорной кладки шахты и допускает раздельное и одновременное выполнение футеровки низа и верха доменной печи.

Система с колоннами, воспринимающими нагрузку от засыпного аппарата и колошниковоу устройства (рис. 2.7) без маратора, применена на мощных доменных печах с полезным объемом до 3200 м³.

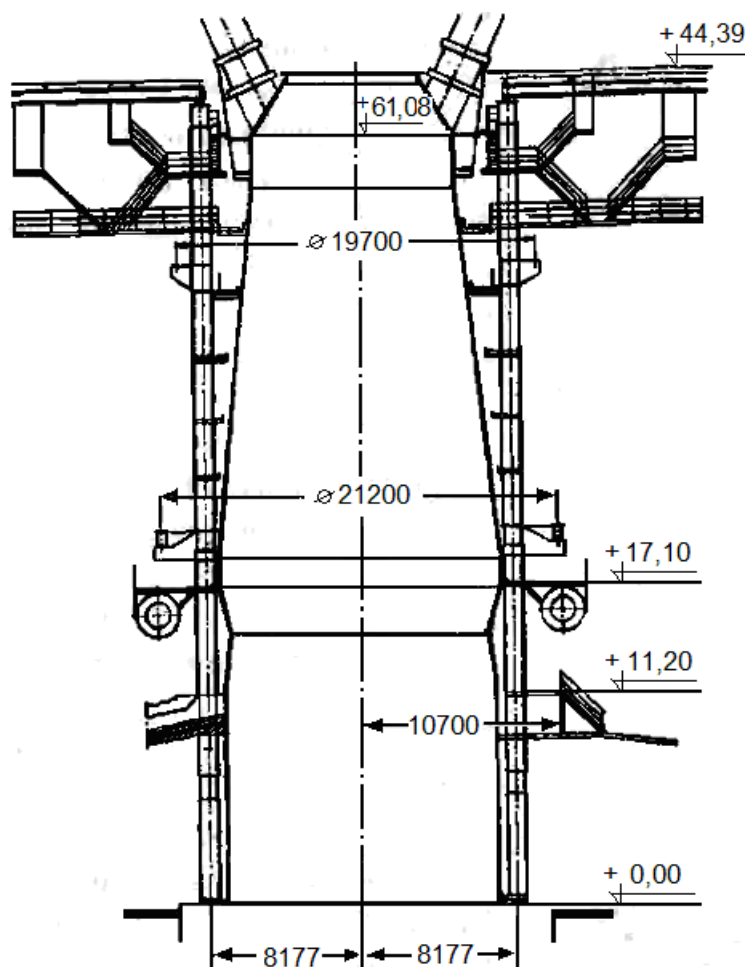


Рис. 2.7. Колонная опорная система доменной печи полезным объемом 3200 м³

На печах объемом более 3200 м³ применяется кожух самонесущей конструкции, т. е. кожух шахты, колошника и купола, который опирается на кожух нижней части печи (мараторное кольцо отсутствует). Опора колошниковоустройства выполняется в двух вариантах в зависимости от типа литейного двора. При прямоугольной его форме опора состоит из шести колонн, связанных вокруг печи кольцевой балкой, передающих нагрузку на фундамент печи. Опорную балку выполняют из стали 10Г2С1.

На печах с кольцевыми литейными дворами опорные колонны отсутствуют, и колошниковое устройство опирается на перекрытие шатра поддоменника (рис. 2.8).

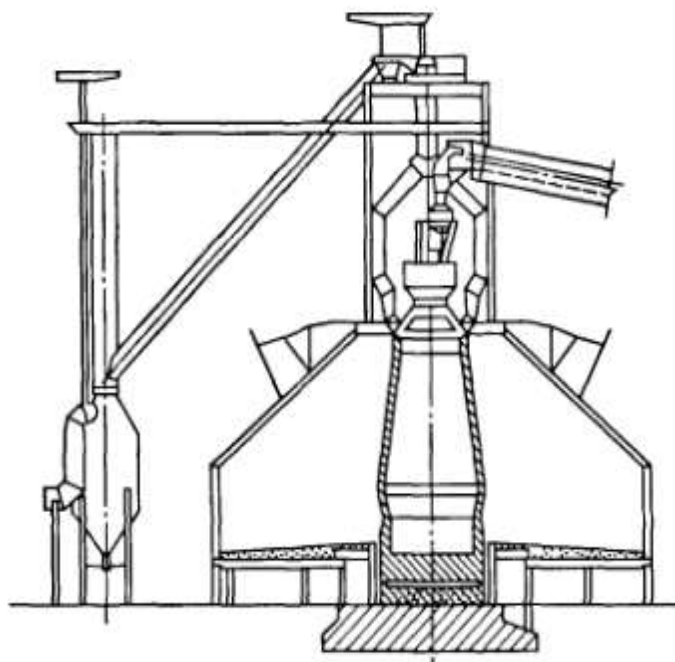


Рис. 2.8. Самонесущий кожух доменной печи с опорой на шатер поддоменника

Для обслуживания холодильников, термопар, газоотборных устройств, осмотра кожуха на уровне распара и по высоте печи устанавливаются площадки. При их установке соблюдается принцип независимого вертикального перемещения кожуха печи и колонн. Площадки связаны между собой лестницами и лифтом.

2.4. Колошниковое устройство

Колошниковое устройство (рис. 2.9) представляет собой многоэтажную металлическую конструкцию (копер), предназначенную для поддержания комплекса механизмов для загрузки шихты в доменную печь, устройств для их монтажа и ремонта. В колошниковое устройство входят также газоотводы с системой клапанов.

Копер опирается на колонны шахты через колошниковую площадку 1 либо, при самонесущем кожухе печи, на специальные колонны или шатер здания литейного двора. На кожух печи опираются только засыпной аппарат и газоотводы. Такая конструкция обеспечивает большую жесткость установки всего оборудования.

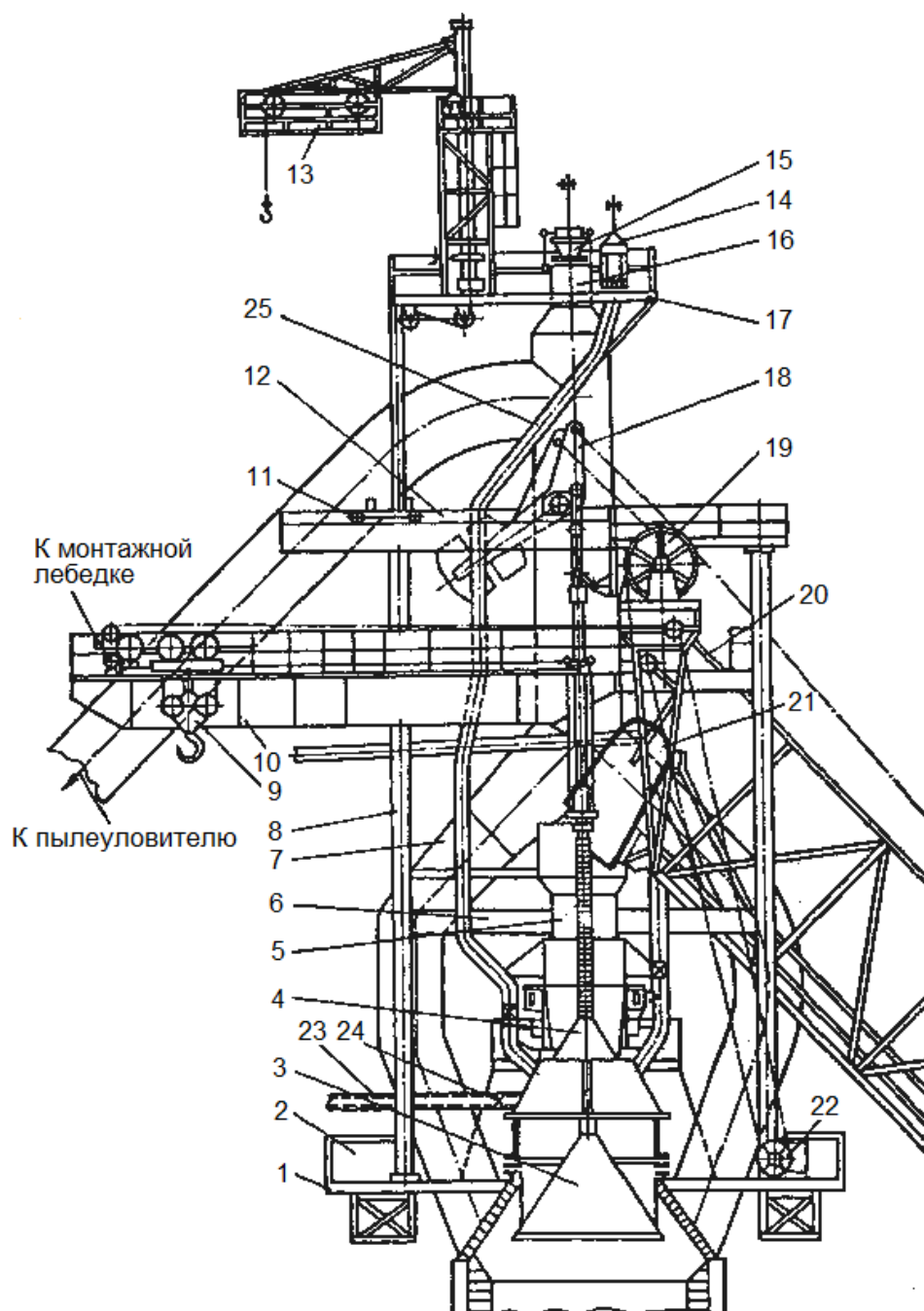


Рис. 2.9. Колошниковое устройство доменной печи с двухконусным засыпным аппаратом:

1 – колошниковая площадка; 2 – лебедка консольно-поворотного крана; 3 – засыпной аппарат; 4 – распределитель шихты; 5 – приемная воронка; 6 – площадка приемной воронки; 7 – газоотводы; 8 – колошниковый копер; 9 – монтажная тележка; 10 – площадка монтажной тележки; 11 – опорная тележка балансиров; 12 – площадка балансиров; 13 – консольно-поворотный кран; 14 – атмосферные клапаны малого конуса; 15 – атмосферные клапаны газоотводов; 16 – свечи газоотводов; 17 – площадка атмосферных клапанов; 18 – балансиры; 19 – шкивы скипового подъемника; 20 – наклонный мост скипового подъемника; 21 – скип; 22 – лебедка монтажной тележки; 23 – газопровод получистого газа; 24 – уравнильный клапан большого конуса; 25 – выпускной газопровод

При двухконусном засыпном устройстве печи копер имеет четыре горизонтальные площадки (площадка приемной воронки, площадка монтажной тележки, площадка балансиров, площадка атмосферных клапанов), предназначенные для установки оборудования.

Колошниковая площадка располагается на отметке верха кожуха печи и является основной рабочей и ремонтной площадкой колошниковоустройства. Основой конструкции является кольцевая балка круглого или прямоугольного сечения. К кольцевой балке крепятся радиальные балки, направленные к оси печи. Необходимая жесткость площадки обеспечивается сплошным листовым настилом толщиной 10 мм. Колошниковая площадка служит для осмотра засыпного устройства и размещения ручной лебедки 22, являющейся приводом для передвижения монтажной тележки 9, и электрической лебедки 2, являющейся приводом механизма подъема консольно-поворотного крана 13.

Площадка приемной воронки 6 предназначена для осмотра и ремонта засыпного устройства. Между колошниковой и второй площадками расположены площадки для размещения привода вращающегося распределителя и осмотра распределителя, уравнивательных клапанов и зондов.

Площадка монтажной тележки 10 служит для доставки оборудования наверх печи и смены вышедших из строя элементов засыпного устройства. Эта площадка вынесена в сторону и снабжена люком, через который поднимается оборудование. По монтажной балке перемещается монтажная тележка, предназначенная для смены и монтажа засыпного устройства.

Площадка балансиров служит для установки и осмотра балансиров, а также размещения опорной тележки 11, предназначенной для поддержания контргрузов во время монтажа и ремонта.

Площадка атмосферных клапанов 17 предназначена для их ремонта и обслуживания. Для облегчения ремонта атмосферных клапанов над площадкой установлен консольно-поворотный кран 13.

Колошниковое устройство современной доменной печи с самонесущим кожухом, четырехколонной опорной системой и бесконусным загрузочным

устройством (БЗУ) представляет собой многоэтажную конструкцию, на которой расположены загрузочное устройство, газоотводы, трубопроводы системы выравнивания давления, минициклоны, клапаны выравнивания давления, атмосферные клапаны. Для монтажа и обслуживания оборудования на колошниковом устройстве имеются тали, козловая тележка, монтажная тележка и консольно-поворотный кран (рис. 2.10).

Кожух купола доменной печи выполняется со специальным люком и лазом для замены лотка загрузочного устройства.

На доменных печах № 5 и № 6 ОАО «ЕВРАЗ-НТМК» для монтажа БЗУ кожух купола имеет кольцо с четырьмя опорными поверхностями (кронштейнами) под металлоконструкции так называемого «малого копра», а собственно БЗУ устанавливается на несущем колошниковом фланце печи. Однако многие металлоконструкции, связанные с обслуживанием БЗУ (площадки, лестницы, стойки), опираются на существующие конструкции колошникового копра.

Стойки «малого копра» имеют небольшой наклон и находятся на расстоянии друг от друга 7,5 м (внизу) – 6,8 м (вверху) в направлении литейных дворов (продольное направление) при постоянном размере 3,3 м в направлении наклонного моста (поперечное направление). Стойки связаны в раму балками. По верхним балкам проходят рельсы сечением 60×60 мм.

На конструкциях «малого копра» размещаются шихтовые бункеры, нижние и верхние клапанные затворы. Здесь сооружаются также площадки и мостики, необходимые для обслуживания отдельных частей оборудования. В районе колошникового фланца между газоотводами печи располагается площадка сложной формы для обслуживания зондов и вращающегося распределителя шихты.

Для подъема и спуска персонала на верхние площадки доменной печи используются две шахты лестниц. Помещения гидравлики и выравнивания давления БЗУ располагаются над помещениями барабанов-сепараторов испарительного охлаждения.

Металлоконструкции изготавливаются из стали С245 (ГОСТ 27772).



61

2.5. Газоотводы

В купол печи врезаются газоотводы (см. рис. 2.10). Они служат для равномерного отвода газа по сечению колошника. Число газоотводов обычно четыре, а для сверхмощных печей объемом 5000–5500 м³ – восемь. Суммарное сечение газоотводов составляет 40–50 % поперечного сечения колошника печи. Сечение газоотводов круглое. Во избежание зарастания их пылью угол наклона газоотводов, отходящих от печи, составляет не менее 50°.

Газоотводы соединяются попарно и выводятся вверх на отметку, превышающую расположение остальных элементов печи. Образующиеся вертикальные газоотводы называются свечами. Свечи перекрываются так называемыми атмосферными клапанами, отрегулированными на определенное заданное давление газа в печи, при превышении которого они самопроизвольно открываются. Кроме того, свечи служат для выпуска газа в атмосферу при остановках и пусках печи.

Вертикальные газоотводы соединяются симметрично в один или два наклонных газоотвода, нисходящих к одному или двум пылеуловителям. Для предотвращения осаждения колошниковой пыли угол наклона газоотводов к горизонту составляет не менее 30–37° и зависит от физических свойств проплавляемого сырья, а также расстояния между осями печи и пылеуловителя. Газоотводы и нисходящий газопровод выполняются сварными из стального листа толщиной 10–12 мм. Изнутри газоотводы и свечи футеруются шамотным кирпичом толщиной 115 мм во избежание излишнего нагрева металла, абразивного износа пылью и для уменьшения конденсации пара при остановках печи. Места перегибов защищаются от истирания пылью стальными плитами или листами из износостойчивой стали.

На доменных печах, работающих с повышенным давлением газа на колошнике, свечи снабжены тарельчатыми открытыми клапанами. Клапан (рис. 2.11) состоит из стального разъемного по горизонтали корпуса 2. Нижним фланцем корпус крепится болтами к переходному патрубку 1, привариваемому

к свече газоотвода. Сверху корпуса установлено седло 3, которое закрыто крышкой 4, шарнирно соединенной валом 7 с плечом рычага 6. Последний вращается на оси 5 в подшипниках. Контактная поверхность корпуса и крышки для уменьшения истирающего действия пыли наплавлена твердым сплавом. В закрытом состоянии крышка плотно прижимается к корпусу действием контргруза, подвешенного на тяге к длинному плечу рычага. Масса контргруза обеспечивает надежное закрытие клапана при работе печи на повышенном давлении. Для открытия клапана служит электропривод.

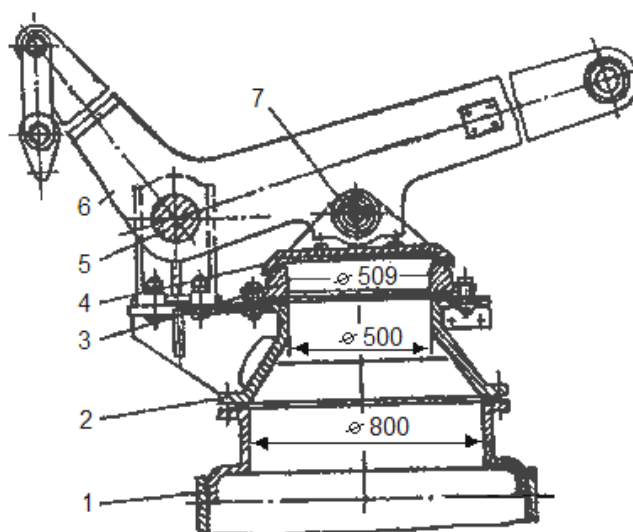


Рис. 2.11. Атмосферный клапан

При работе на повышенном давлении доменная печь, имеющая двухконусное загрузочное устройство, оборудуется системой газопроводов и клапанов для выравнивания давления перед опусканием конусов. Для нормальной работы большого конуса в межконусное пространство подается очищенный газ по газопроводу получистого газа 23 (см. рис. 2.9), соединяющему межконусное пространство и газопровод, отводящий газ после полутонкой очистки. В межконусное пространство газ поступает через уравнильный клапан большого конуса 24 тарельчатого типа.

3. УСТРОЙСТВО ОГНЕУПОРНОЙ КЛАДКИ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

3.1. Назначение и условия службы огнеупорной кладки

Огнеупорная кладка печи предназначена для формирования и изоляции рабочего пространства печи, уменьшения тепловых потерь и предохранения кожуха печи от тепловых и других вредных воздействий. Кладка печи претерпевает многообразные воздействия: температурные напряжения, давление газов, шихты и жидких продуктов плавки, химическое воздействие, абразивное воздействие опускающихся шихтовых материалов и восходящего потока газа, несущего большое количество пыли, и т. д. Чтобы кладка печи выполняла свое назначение, материалы, из которых она изготовлена, должны обладать достаточными теплоизоляционными свойствами, а чтобы доменная печь достаточно долго работала, ее кладка должна хорошо противостоять разрушающим воздействиям, которым она подвергается в печи.

В различных частях печи воздействия на огнеупорную кладку неодинаковы, поэтому материал футеровки и конструкцию отдельных частей печи необходимо выбирать с учетом этих воздействий.

Тепловые воздействия, давление газов, шихты и жидких продуктов плавки увеличиваются от верхних зон к нижним. При повышении температуры также усиливается насыщение огнеупорного материала примесями, понижающими его огнеупорность, вплоть до расплавления (шлакование огнеупора).

Большое значение для службы огнеупорной кладки имеет так называемый гарнисаж – продукт взаимодействия компонентов шихты и шлака с материалом футеровки. В результате взаимодействия образуется жидкая фаза, застывающая при соприкосновении с более холодными стенами печи. При некоторой толщине гарнисажа между скоростью его нарастания и износом наступает равновесие. Наличие гарнисажа дает возможность работать при незначительной толщине футеровки.

Кладка лещади постоянно находится под значительным слоем жидкого чугуна, присутствующего в металлоприемнике и зумпфе, испытывает большое гидростатическое давление и температурные напряжения. Благодаря этим воздействиям чугун проникает в массив кладки. Проникая в щели, поры, трещины и швы кладки, он достигает горизонтов, где затвердевает (температура затвердевания чугуна составляет примерно 1150 °С). Затвердевая, чугун увеличивает объем (он имеет такую же аномалию, как и вода) и увеличивает щель или трещину. Поскольку в реальной доменной плавке имеет место неизбежное колебание температуры, то при последующем повышении температуры застывший чугун расплавляется, уменьшается его объем и в щель набирается большее количество чугуна. Таким образом, происходит прогрессивное разрушение кладки лещади. При этом отдельные кирпичи теряют связь с кладкой и всплывают на поверхность чугуна. Температурные напряжения приводят к перерождению структуры огнеупорного материала, деформациям и трещинам, также вызывающим постепенное разрушение кладки. Для увеличения стойкости лещади кладку следует вести из большемерного кирпича (блоков) со швами минимальной толщины, а также хорошо крепить ее, чтобы предотвратить расхождение швов при нагревании.

Кладка нижней части горна – металлоприемника – также испытывает расклинивающее действие застывающего чугуна, но в меньшей степени, так как чугун оказывает меньшее гидростатическое давление на кольцевую кладку металлоприемника. Кладка металлоприемника омывается шлаком, который взаимодействует с материалом кладки, разрушая ее. Однако при достаточно интенсивном охлаждении возможно образование гарнисажа, защищающего футеровку от дальнейшего разрушения. Этим объясняется большая стойкость стен металлоприемника по сравнению с лещадью.

Относительно разъедающего воздействия шлаков нужно отметить следующее. Доменные шлаки с точки зрения химического воздействия на огнеупоры можно отнести к нейтральным, поскольку в них отношение основных

оксидов к кислым (основность шлака – CaO/SiO_2) в реальных условиях колеблется в пределах 0,9–1,3, т. е. это отношение близко к единице. В связи с этим из имеющихся огнеупоров нужно выбрать такой, который бы характеризовался (с химической стороны) нейтральными свойствами. В ином случае будет наблюдаться взаимодействие получающегося в печи шлака с огнеупорной кладкой. К примеру, нельзя использовать для кладки доменной печи динасовыи огнеупоры, в которых содержание диоксида кремния (SiO_2) достигает 96 % и выше. При такой кладке оксид кальция (CaO), находящийся в шлаке, будет взаимодействовать с SiO_2 огнеупора, образуя силикаты кальция $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$.

Служба кладки верхней части горна – фурменной зоны – значительно отличается от службы ее в металлоприемнике. Гидростатическое давление чугуна и шлака на стены фурменной зоны сравнительно невелико. Однако в этой зоне развиваются самые высокие в доменной печи температуры (здесь происходит горение топлива), воздействующие на огнеупорную кладку. Кладка фурменной зоны подвергается также воздействию шлака и газа, особенно при продувке через чугунную летку. Огнеупорная кладка этой зоны должна быть плотной и не допускать продува газа. Огнеупорный материал должен иметь высокую огнеупорность и хорошо сопротивляться растворяющему действию шлаков.

В заплечиках, расположенных в непосредственной близости от очагов горения, развиваются высокие температуры. Рудная часть шихты находится в жидком состоянии и, стекая в виде капель и струек чугуна и шлака между кусками кокса, частично попадает на огнеупорную кладку. Кроме того, огнеупорная кладка интенсивно оmyвается газами. Таким образом, кладка заплечиков находится в тяжелых условиях, испытывая, помимо термических напряжений, химическое воздействие газов, жидкого шлака и чугуна.

Нижняя часть шахты, так же как и заплечики, подвержена наибольшему износу, и поэтому стойкость этих участков фактически определяет срок службы всей доменной печи. Основными причинами износа кладки нижней части шахты являются довольно сильное тепловое напряжение, интенсивное химическое

воздействие шлаков, паров щелочей, монооксида углерода, цинка, значительные колебания высоких температур, способствующие возникновению термических ударов, абразивный износ, создаваемый опускающейся шихтой.

В верхней части шахты, наоборот, тепловое напряжение невелико, химическое воздействие шлака отсутствует, а абразивное воздействие материалов и газового потока более значительно.

В средней и верхней частях шахты разрушение огнеупорной кладки происходит также вследствие отложения в швах и трещинах сажистого углерода, образующегося в результате разложения монооксида углерода по реакции



Отложение сажистого углерода приводит к перерождению структуры огнеупорного кирпича и росту кладки. Наиболее интенсивно отложение сажистого углерода идет в интервале температур 500–600 °С. Напряжения, возникающие в кладке, оказываются настолько большими, что явление отложения $\text{C}_{\text{саж}}$ приводит к скалыванию огнеупорных материалов. Нужно отметить также, что катализатором для развития реакции распада СО является металлическое железо. В связи с этим в огнеупорных материалах ограничивается содержание оксидов железа, поскольку при воздействии восстановителей, находящихся в газе, будет наблюдаться их восстановление с образованием железа, что усиливает выделение сажистого углерода.

При плавке цинксодержащих руд рост и разрушение кладки вызывается также оксидом цинка, конденсирующимся из газовой фазы в швах и трещинах огнеупорного кирпича. Отложение цинка в огнеупорной кладке приводит к ее росту. Разрушающее воздействие цинка на огнеупорную кладку печи усиливается еще и потому, что коэффициент температурного расширения цинка в 30 раз превосходит это значение для огнеупорного материала. Рост кладки вследствие отложения цинка в кладке печи при плавке цинксодержащих железорудных материалов значителен. Установлено, что наличие цинка в рудном материале может вызывать рост кладки в высоту до 400 мм, а по радиусу – до

250 мм. Это может привести к разрыву кожуха печи. При доменной плавке подобных рудных материалов явление отложения цинка в кладке необходимо учитывать. Так, к примеру, компенсационные (температурные) зазоры между кладкой и кожухом печи необходимо увеличить до 200 мм и более (вместо 100 мм при плавке материалов, не содержащих соединений цинка). Эти зазоры нужно заполнять неуплотняемой засыпкой.

Огнеупорная кладка колошника разрушается в основном от ударной нагрузки при падении материалов с засыпного аппарата.

В зависимости от характера работы кладки в различных частях печи вытекают требования, предъявляемые к огнеупорному кирпичу. Прежде всего, кирпич должен обладать достаточной огнеупорностью. Особенно это важно для выкладки нижней части печи, где кирпич испытывает действие высоких температур и сравнительно слабое механическое воздействие.

Кирпич не должен терять механическую прочность при нагреве и растворяться в шлаке. Воздействию шлака препятствует высокая плотность кирпича.

Кирпич должен обладать достаточно высокими теплоизоляционными свойствами и хорошо противостоять истиранию.

Для исключения отложений сажистого углерода кирпич должен иметь низкую пористость, т. е. иметь низкую газопроницаемость и минимальное содержание оксидов железа.

И наконец, весьма важным является точность размеров кирпича, что обеспечивает получение швов минимальных размеров.

3.2. Огнеупорные материалы

Огнеупоры – это неметаллические материалы, способные выдерживать механические, химические и другие виды нагрузок при температурах свыше 1580 °С.

По химико-минеральному составу огнеупоры делятся на кислые, нейтральные и основные. По химическому составу они подразделяются на кремнеземистые, алюмосиликатные, глиноземистые, глиноземистовещные, высоко-

магнезиальные, магнезиальноизвестковые, известковые, магнезиальношпинелидные, магнезиальносиликатные, хромистые, цирконистые, оксидные, углеродистые, оксидоуглеродистые, карбидкремниевые, бескислородные и т. д. (табл. 3.1).

Таблица 3.1

Классификация огнеупоров по химическому составу
(ГОСТ 28874)

Тип огнеупоров	Группа	Доля определяющих химических компонентов на прокаленное вещество, %
Кремнеземистые	Из кварцевого стекла	$\text{SiO}_2 \geq 97$
	Динасовые	$\text{SiO}_2 \geq 93$
	Динасовые с добавками	$80 \leq \text{SiO}_2 < 93$
	Кварцевые	$\text{SiO}_2 \geq 85$
Алюмосиликатные	Полуокислые	$\text{SiO}_2 < 95, \text{Al}_2\text{O}_3 < 28$
	Шамотные	$28 < \text{Al}_2\text{O}_3 \leq 45$
	Муллитокремнеземистые	$45 < \text{Al}_2\text{O}_3 \leq 62$
	Муллитовые	$62 < \text{Al}_2\text{O}_3 \leq 72$
	Муллитокорундовые	$72 < \text{Al}_2\text{O}_3 \leq 90$
	Из глинокремнеземистого стекла	$40 \leq \text{Al}_2\text{O}_3 \leq 90$
Глиноземистые	Корундовые	$\text{Al}_2\text{O}_3 > 90$
Глиноземизвестковые	Алюминаткальциевые	$\text{Al}_2\text{O}_3 > 65, 10 < \text{CaO} < 35$
Магнезиальные	Периклазовые	$\text{MgO} \geq 85$
Магнезиальноизвестковые	Периклазоизвестковые	$50 < \text{MgO} < 85, 10 \leq \text{CaO} < 45$
	Периклазоизвестковые стабилизированные	$35 < \text{MgO} < 75, 15 < \text{CaO} \leq 40, \text{CaO} : \text{SiO}_2 > 2$
	Известковопериклазовые	$10 < \text{MgO} \leq 50, 45 < \text{CaO} \leq 85$
Известковые	Известковые	$\text{CaO} \geq 85$
Магнезиальношпинелидные	Периклазохромитовые	$\text{MgO} \geq 60, 5 \leq \text{Cr}_2\text{O}_3 \leq 20$
	Хромитопериклазовые	$40 \leq \text{MgO} < 60, 15 \leq \text{Cr}_2\text{O}_3 \leq 35$
	Хромитовые	$\text{MgO} < 40, \text{Cr}_2\text{O}_3 > 30$
	Периклазошпинелидные	$50 \leq \text{MgO} < 85, 5 \leq \text{Cr}_2\text{O}_3 \leq 20, \text{Al}_2\text{O}_3 \leq 25$
	Периклазошпинельные	$\text{MgO} > 40, 5 \leq \text{Al}_2\text{O}_3 \leq 55$
	Шпинельные	$25 \leq \text{MgO} \leq 40, 55 < \text{Al}_2\text{O}_3 \leq 70$
Магнезиальносиликатные	Периклазофорстеритовые	$65 \leq \text{MgO} < 85, \text{SiO}_2 \geq 7$
	Форстеритовые	$50 \leq \text{MgO} < 65, 25 \leq \text{SiO}_2 \leq 40$
	Форстеритохромитовые	$45 \leq \text{MgO} < 60, 20 \leq \text{SiO}_2 \leq 30, 5 \leq \text{Cr}_2\text{O}_3 \leq 15$
Хромистые	Хромоксидные	$\text{Cr}_2\text{O}_3 \geq 90$
Цирконистые	Бадделеитовые	$\text{ZrO}_2 > 90$
	Бадделеитокорундовые	$20 \leq \text{ZrO}_2 \leq 90, \text{Al}_2\text{O}_3 \leq 65$
	Цирконовые	$\text{ZrO}_2 > 50, \text{SiO}_2 > 25$

Тип огнеупоров	Группа	Доля определяющих химических компонентов на прокаленное вещество, %
Окисные	Специальные из огнеупорных оксидов: BeO, MgO, CaO, Al ₂ O ₃ , Cr ₂ O ₃ , SiO ₂ , V ₂ O ₃ , Sc ₂ O ₃ , ZnO ₂ , ZrO ₂ и др.	Максимально достижимое содержание перечисленных оксидов, соединений и твердых растворов на основе этих оксидов
Углеродистые	Графитированные	$C > 98$
	Угольные	$C > 85$
	Углеродсодержащие	$8 \leq C \leq 82$
Карбидкремниевые	Карбидкремниевые	$SiC > 70$
	Карбидкремнийсодержащие	$15 \leq SiC \leq 70$
Бескислородные	Из нитридов, боридов, карбидов, силицидов и других бескислородных соединений (кроме углеродистых)	Максимально достижимое содержание бескислородных соединений

Основные параметры, характеризующие свойства огнеупоров, представлены ниже.

1. *Огнеупорность* – способность выдерживать без нагрузки и сохранять без существенных нарушений свои функциональные свойства при воздействии высоких температур (более 1580 °С) не расплавляясь.

2. *Пористость*. Поры в огнеупорах могут быть открытыми и закрытыми. Различают общую, кажущуюся и закрытую пористость. Общая пористость определяется как отношение объема всех пор к объему изделия. Кажущаяся пористость – как отношение открытых пор к объему изделия. Закрытая пористость – как отношение объема закрытых пор к объему изделия. Пористость некоторых огнеупорных изделий имеет следующие значения (%):

- диас – 20–25;
- шамот – 24–30;
- высокоглиноземистые огнеупоры – 10–30;
- периклазовые огнеупоры – < 25;
- периклазо-хромитовые огнеупоры – < 23.

3. *Механическая прочность при комнатной температуре*. В качестве показателя используется предел прочности при сжатии. Прочность огнеупоров за-

висит от пористости. Для обычных изделий она составляет 20–50 МПа, для плотных – до 100 МПа.

Значения прочности для некоторых огнеупоров, МПа:

- динасовые – 17,5–25;
- шамотные – > 25;
- высокоглиноземистые – > 45;
- периклазовые – > 40.

4. *Температура деформации под нагрузкой 0,2 МПа* (табл. 3.2). При этом отмечают температуру начала деформации (размягчения): 4 и 40 % сжатия образца высотой 50 мм и диаметром 36 мм. Деформация под нагрузкой при высоких температурах определяется количеством образующейся жидкой фазы и ее распределением в образце. Температура 4 % деформации является по существу предельной температурой службы огнеупора, а 40 % деформации – температурой разрушения образца.

Таблица 3.2

Деформационные свойства огнеупоров

Огнеупор и его характеристика	Количество стекла, мас. %	Огнеупорность, °С	Температура деформации под нагрузкой 0,2 Н/мм ² , °С		Интервал деформации, °С
			начало размягчения	40 %-ное сжатие	
1. Динасовый (96 мас. % SiO ₂)	10–15	1730	1660	1670	10
2. Периклазовый (92 мас. % MgO)	5–8	2300	1550	1580	30
3. Шамотный (40 мас. % Al ₂ O ₃ – 50 мас. % SiO ₂)	~ 50	1750	1400	1600	200
4. Корундовый (99 мас. % Al ₂ O ₃)	~ 0.5	2050	1900	1950	50

5. *Термостойкость* – это способность огнеупоров выдерживать без разрушения резкие колебания температуры. Термостойкость характеризуется числом теплосмен, т. е. циклов нагрева и охлаждения.

6. *Химическая стойкость.* До 70 % огнеупоров разрушается в результате взаимодействия со шлаком, металлом и газами. Наиболее сильное разрушающее воздействие оказывают шлаки. Оценить шлакоустойчивость огнеупора одним показателем сложно. Здесь сказывается состав огнеупора, его пористость, температура взаимодействия, гидродинамические условия.

7. *Постоянство объема.* Сохранение постоянного объема – важная характеристика огнеупоров, потому что в этом случае в кладке не возникает дополнительных напряжений.

В действительности все огнеупоры во время службы в теплотехнических устройствах испытывают рост или усадку вследствие усадки материала или термического расширения. Дополнительную усадку или рост определяют по разности объемов образца, измеренных до и после обжига при заданной температуре по формуле

$$\Delta V = \frac{(V_1 - V_0) \cdot 100}{V_0}, \quad (3.2)$$

где V_0 и V_1 – объемы образца до и после обжига.

Линейную усадку или рост определяют по формуле

$$\Delta = \Delta V / 3. \quad (3.3)$$

Дополнительная усадка или рост не должны превышать в условиях службы 0,5–1,0 %. Температурный коэффициент линейного расширения $\alpha \cdot 10^{-6}$ для разных огнеупоров в интервале температур 20–1000 °С имеет следующие значения:

- шамот – 4,5–6,0;
- корундовые огнеупоры – 8,0–8,5;
- периклазовые огнеупоры – 14–15;
- диносовые огнеупоры – 11,5–13,0;
- хромопериклазовые огнеупоры – 10,0.

Зная величину α , можно рассчитать величину температурного шва кладки в миллиметрах на 1 м по формуле

$$\delta = \alpha \cdot t \cdot 10^3. \quad (3.4)$$

Кроме перечисленных свойств, практическое значение имеют теплоемкость, теплопроводность, электропроводность, газопроницаемость, аккумулирующая способность огнеупоров, температуропроводность и др.

Теплопроводностью (λ , Вт/(м·град)) [1 Вт/(м·град) = 0,86 ккал/(м·ч·град)] огнеупора определяется изменение температур по толщине футеровки при одностороннем стационарном ее нагреве и величина возникающих термических напряжений, а также количество теряемого через футеровку тепла. Теплопроводность огнеупорных материалов зависит от составляющих фаз и характера их структуры и определяется той фазой, которая является сплошной средой.

Количество тепла (ΔQ), отводящегося через поверхность S за время τ , определяется законом Фурье:

$$\Delta Q = \lambda \cdot \frac{dt}{dx} \cdot S \cdot \tau, \quad (3.5)$$

где λ – коэффициент теплопроводности;

$\frac{dt}{dx}$ – изменение температуры в направлении x ;

S – поверхность теплообмена;

τ – время.

В общем случае коэффициент теплопроводности (λ) определяется формулой

$$\lambda = a + b \cdot T + c \cdot T^2 + d \cdot T^3. \quad (3.6)$$

Эмпирический коэффициент λ является одной из теплофизических характеристик вещества и определяется его структурой. Численные значения λ для разных материалов составляют, Вт/(м·К), при 20 °С:

воздух – 0,025;

вода – 0,54;

строительные материалы – 2–15;

теплоизоляционные материалы – 0,15–0,40;

металлы – 10–500.

Поскольку величина λ для газов на два порядка ниже, чем для строительных материалов, их эффективная теплопроводность при увеличении пористости снижается. Для огнеупорных материалов зависимость коэффициента теплопроводности от пористости определяется выражением

$$\lambda_{\text{п}} = \lambda_0 \cdot (1 - a \cdot \epsilon), \quad (3.7)$$

где $\lambda_{\text{п}}$ и λ_0 – коэффициент теплопроводности пористого и сплошного тела соответственно;

a – коэффициент; при увеличении пористости от 0,1 до 0,25 д. ед. изменяется от 2,0 до 2,6.

Распределение температур в огнеупоре при стационарном тепловом режиме определяется коэффициентом температуропроводности (a , м²/ч). Температуропроводность a материала зависит от его теплоемкости c , коэффициента теплопроводности λ , кажущейся плотности ρ и определяется по формуле

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho}. \quad (3.8)$$

Теплоемкостью [c , Дж/(кг·град)] огнеупора определяется тепловая инерция технологического агрегата и характеризуется количество тепла, аккумулированного кладкой.

Аккумулирующая способность огнеупоров (b) характеризует способность материала принимать при нагреве и отдавать при охлаждении теплоту. Она выражается формулой

$$b = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c}. \quad (3.9)$$

Для огнеупорной футеровки доменной печи используют алюмосиликатные (шамотные, высокоглиноземистые), карбидкремниевые и углеродистые огнеупоры. Состав и свойства алюмосиликатных огнеупоров для кладки доменных печей приведены в табл. 3.3.

Шамот – огнеупорный материал, получаемый из огнеупорной глины. Шамот в основном состоит из двух оксидов – Al_2O_3 и SiO_2 . Остальных оксидов в нем содержится не более 3–4 %. Огнеупорность и «нейтральность» (по химическому взаимодействию с доменными шлаками) шамоту придает глинозем Al_2O_3 , поскольку этот оксид является амфотерным. Этот оксид определяет не только нейтральность, но и огнеупорность шамота. В связи с этим шамот делится на классы: А, Б и В.

Таблица 3.3

Состав и свойства алюмосиликатных огнеупоров для доменных печей

Показатели	Шамотный кирпич		Высокоглиноземистый кирпич		
	класс А	класс Б	ДВ-1 ДВ-2	ДВ-5 ДВ-6	муллитовый
Химический состав, %:					
$Al_2O_3 + TiO_2$, не менее	39	35	45	62	$\geq 65-70$
Fe_2O_3 , не более	1,6	1,6	1,5	1,5	$\leq 1,0-1,5$
SiO_2	55	59	53,5	36,5	-
$RO + R_2O$, не более	4,4	4,4	–	–	–
Огнеупорность, °С, не ниже	1730	1700	1750	1800	≥ 1830
Температура начала деформации под нагрузкой (20 Н/см^2), °С, не ниже	1400	1360	1400	1500	$\geq 1640-1680$
Дополнительная усадка при температуре 1400 °С, %, не более	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2
Общая пористость, %	24–30		10–30		
Кажущаяся пористость, %, не более	18	19	17	15	10–12
Плотность, г/см^3	2,0	2,0			
Предел прочности при сжатии, кН/см^2 , не менее	4,0	5,5	5,0	6,0	15–20
Удельная теплоемкость, $\text{кДж/(кг}\cdot\text{К)}$, при температуре 473 К	0,94		1,13 (для муллитовых)		
Температурный коэффициент теплопроводности λ , $\text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$	$1,16 \cdot (0,72 + 0,0005T)$		$1,16 \cdot (1,45 - 0,0002T)$ (для муллитовых)		
Коэффициент λ_x , $\text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$, при рабочей температуре (рабочая температура, К)	1,65 (1620–1720)		1,299 (1920) (для муллитовых)		
Коэффициент линейного расширения, $\text{м/(м}\cdot\text{град)} \cdot 10^6$ (в интервале температур, К)	5,2–5,8 (293–1573)		4,8–5,5 (293–1273) (для ДВ-5, ДВ-6)		

Шамот класса А должен содержать не менее 39 % глинозема. Его огнеупорность должна быть не менее 1730 °С, а температура начала деформации под нагрузкой 2,0 кг/см² – не ниже 1400 °С, пористость – не выше 17 %. Оговаривается усадка при температуре 1400 °С – она не должна быть выше 0,2 %.

Шамот класса Б должен содержать глинозема не менее 35 %. Огнеупорность его должна быть не ниже 1700 °С, пористость – не более 19 %, а дополнительная усадка при температуре 1400 °С – не выше 0,3 %.

Шамот класса В содержит Al_2O_3 ниже 35 % и по своим характеристикам непригоден для кладки доменных печей.

Во всех классах шамотных огнеупоров содержание оксида железа Fe_2O_3 должно быть не более 1,6 %. Лучше, если шамотный огнеупор подвергается восстановительному обжигу, при котором из высшего оксида (Fe_2O_3) получается FeO. При взаимодействии FeO с кремнеземом шамота образуется трудновосстановимый фаялит Fe_2SiO_4 , который ограничивает образование металлического железа и развитие реакции распада монооксида углерода (3.1) с образованием сажистого углерода, разрушающего кладку печи.

Шамотные огнеупоры для кладки доменных печей выпускаются в виде кирпичей. Для исключения появления вертикальных швов при кладке печи огнеупорные кирпичи делятся на «нормальные» – длиной 230 мм и «полуторные» – длиной 345 мм. Для возможности осуществления кладки различного радиуса имеются «прямые» и «клиновые» изделия.

Размеры «прямых и нормальных» огнеупоров:

230x150x75 мм и 230x115x75 мм.

«Прямые – полуторные» огнеупоры: 345x150x75 мм и 345x115x75 мм.

«Клиновые – нормальные»: 230x150x130x75 мм и 230x150x120x75 мм.

«Клиновые – полуторные»: 345x150x125x75 мм и 345x150x110x75 мм.

По точности изготовления шамотные изделия делятся по сортам: I, II и III. Чем точнее форма и размеры кирпича, тем тоньше можно делать швы при

кладке. При выполнении кладки из кирпича I сорта можно обеспечить толщину швов менее 0,5 мм.

При кладке нижней части доменных печей помимо шамотных огнеупоров применяются высокоглиноземистые. Они должны содержать не менее 45 % глинозема. Огнеупорность высокоглиноземистых огнеупоров должна быть не ниже 1750 °С, а температура начала деформации под нагрузкой 2 кг/см² – не ниже 1400 °С. Остальные требования, предъявляемые к данным огнеупорам, такие же, как и к шамотным изделиям. Высокоглиноземистые огнеупоры применяются для кладки лещади доменной печи. Они делаются в виде большемерных кирпичей: 400х200х100 мм и 400х150х100 мм.

В доменных печах большого объема, работающих с удельной производительностью 2,0–2,5 т чугуна/(м³·сут) при давлении колошникового газа 0,2–0,25 МПа, даже муллитовые огнеупоры в нижней части шахты оказываются недостаточно стойкими. Чаще всего в этих участках печи стали применять огнеупоры с очень высоким содержанием глинозема: обожженные корундовые на муллитовой связке (88–94 % Al₂O₃, открытая пористость 13,5–15 %), обожженные на глиноземистой связке (88 % Al₂O₃, открытая пористость 13–16 %), обожженные корунд-хромитовые (92 % Al₂O₃, 7,5 % Cr₂O₃, открытая пористость 16–19 %).

Высокоглиноземистые огнеупоры обладают повышенной устойчивостью к воздействию доменных шлаков, эрозии жидким чугуном, истиранию при высоких температурах и инертны к монооксиду углерода. Однако при работе в условиях высоких температур в щелочной среде наблюдается переход корунда в β-глинозем. Такой переход сопровождается увеличением объема на 20 % и приводит к растрескиванию. С парами щелочей в первую очередь взаимодействует связка. Замена в корундовых кирпичах корундовой связки на муллитовую или хромоглиноземистую повышает устойчивость изделий к воздействию щелочей.

Для футеровки лещади и металлоприемника доменных печей широко применяют углеродистые огнеупоры. Углеродистые огнеупоры бывают коксо-

вые и графитовые. Коксовые огнеупоры изготавливают из кокса и в качестве связки добавляют смолу и битум. Содержание золы в коксе должно быть не более 8–10%. Изделия формуют набивкой и обжигают в восстановительной газовой среде в муфелях или при засыпке углем в капсулах. Их обжигают при температуре до 1400–1450 °С. Восстановительная среда в данном случае создает условия для использования этих изделий в области высоких температур. Свойства углеродистых огнеупоров приведены в табл. 3.4.

Таблица 3.4

Состав и свойства углеродистых огнеупоров

Показатели	Графитированные блоки	Углеродистые кирпичи (блоки)
Химический состав, %:		
С, не более	92–95	92
зола, не более	5–8	8
Огнеупорность, °С, не ниже	2500–2600	2000
Температура начала деформации под нагрузкой (20 Н/см ²), °С, не ниже		1800
Кажущаяся пористость, %, не более	–	24
Предел прочности при сжатии, кН/см ² , не менее	3,5	2,5–3,0
Удельная теплоемкость, кДж/(кг·К), при температуре 473 К	1,36	1,97
Температурный коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·К)	(140–0,035t)1,16	(20–0,030t)1,16
Коэффициент λ_x , Вт/(м·К), при рабочей температуре (рабочая температура, К)	16,24 (2270)	81,2 (2270)
Коэффициент линейного расширения, м/(м·град)·10 ⁶ (в интервале температур, К)	(1,4–2,7)/(2,2–4,7) ¹⁾ (473–1823)	(2,4–3,4)/(3,9–4,2) (473–1823)

¹⁾ В числителе – коэффициент линейного расширения, измеренный в направлении, параллельном усилию прессования блоков; в знаменателе – в направлении, перпендикулярном усилию прессования.

Углеродистые огнеупоры хорошо противостоят высоким температурам в безокислительной атмосфере. Этому способствуют их свойства:

- высокая огнеупорность, термостойкость и прочность при высоких температурах (не размягчается до температуры возгонки углерода – 3600 °С; деформация под нагрузкой не наблюдается даже при 1800 °С);
- несмачиваемость чугуном и шлаком;
- небольшой коэффициент расширения, что позволяет изготавливать кирпичи больших размеров (блоки);

– значительно большая теплопроводность, чем у шамотных. Повышенная теплопроводность этих огнеупоров желательна для более интенсивного отвода тепла к холодильникам и ограничения разгара кладки лещади и горна.

Однако углеродистые огнеупоры имеют недостатки: они плохо противостоят истиранию, боятся паров воды и щелочей, диоксида углерода и оксидов железа, находящихся в первичном шлаковом расплаве. Это объясняется возможностью протекания реакций



Монооксид железа FeO может присутствовать в первичном шлаке. Конечному шлаку, содержание FeO в котором составляет 0,4–0,6 % (редко достигает 1,0 %), углеродистый огнеупор противостоит хорошо.

Углеродистые огнеупоры применяются в виде блоков размерами 400х400х(1980–3000) мм. Для кладки стен горна применяются блоки, имеющие клиновую форму со скошенным концом. Длина их меняется в диапазоне 1400–1000 мм через каждые 100 мм. Это позволяет выкладывать стенки горна разной толщины.

В настоящее время в доменном производстве получили применение новые виды огнеупоров, увеличивающих длительность кампаний доменных печей. Вместе с этим изменилась технология сооружения кладки. Она сооружается из различных видов огнеупоров с распределением их по горизонтам печи в соответствии с процессами, происходящими в ней по высоте профиля. К таким видам относятся карбидкремниевые, нитридные и другие огнеупоры. Они обладают высокой прочностью и теплопроводностью, повышенной стойкостью к воздействию шлаков и истирающим воздействиям шихты и газовых пылевых потоков.

Наиболее стойкими из них являются карбидкремниевые, с успехом применяемые в нижних горизонтах печи в зарубежной практике. Они отличаются

высокой плотностью – $2,3\text{--}2,6\text{ г/см}^3$, пониженной пористостью – $13,6\text{--}15,4\%$, высокой огнеупорностью (более $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$). Коэффициент термического расширения карбидкремниевых огнеупоров в температурном интервале $293\text{--}2073\text{ К}$ составляет $(3,5\text{--}4,7)\cdot 10^{-6}\text{ м/(м}\cdot\text{К)}$. Различные марки карбидкремниевых огнеупоров имеют различные свойства по пределу прочности, термическому расширению, модулю упругости и другие в зависимости от содержания SiO_2 ($1,3\text{--}7,3\%$) и Al_2O_3 ($0,3\text{--}0,5\%$).

Использование этих видов огнеупоров особенно важно для печи в области распара и низа шахты, поскольку в них происходит наибольший износ футеровки от воздействия на нее процессов различного характера, присущих доменной плавке.

Карбид кремния – химически инертный огнеупорный материал с исключительно высокой стойкостью к абразивному износу и лучшей устойчивостью к окислению в сравнении с углеродистыми изделиями. Основная проблема применения карбидкремния в доменной печи состоит в разработке связки с достаточно высокой устойчивостью к щелочам. Из карбидкремнийграфитовых изделий на смоляной связке, карбидкремниевых на керамической (глинистой), оксинитридной и нитридной связках лучшую стойкость имеют изделия на нитридной Si_3N_4 и оксинитридной Si_3ON_2 связках. Однако более щелочеустойчивым оказался «самосвязанный» карбид кремния. Поскольку самосвязанный карбид кремния труден в изготовлении, разработаны различные комбинации огнеупоров, содержащие карбид кремния: глиноземокарбидкремниевые, графитокарбидкремниевые и др.

В ряде случаев в последнее время футеровку шахт доменных печей также выполняют карбидкремниевыми огнеупорами. В целях механизации выполнение футеровки осуществляется набивными торкрет-массами. Карбидкремнийсодержащие массы характеризуются повышенной стойкостью к шлаковым расплавам и газовым средам. В качестве исходных материалов для бетонов используется высокоглиноземистый шамот и карбид кремния, а также связую-

щие – высокоглиноземистый цемент и жидкое стекло. Шахты с бетонными футеровками находятся в эксплуатации и показывают удовлетворительную работу.

Проходят испытания (в нижней части шахты, распаре и заплечиках) периклазовые огнеупоры. Они показали стойкость выше, чем высококачественные шамотные, но ниже карбидкремниевых.

Независимо от химико-минералогического состава доменных огнеупоров к ним предъявляются повышенные требования по пористости. Считается, что при пористости изделий менее 12 % пропитка их шлаками резко снижается. При низких температурах пропитка огнеупоров шлаками в 5–6 раз ниже, чем изделий с пористостью 17 %, а при температуре 980 °С – уже в 10–20 раз.

При кладке доменной печи из огнеупорных кирпичей применяются растворы. Порошок, используемый для приготовления растворов, называется мертелем. При кладке нижней части печи (горн, заплечики, распар) применяется шамотно-глиняный жидкий раствор. На 1 м³ сухого мертеля добавляется 600 литров воды. Мертель шамотно-глиняного раствора состоит из шамотного порошка (65–85 %) и огнеупорной глины (35–15 %). Чем больше в мертеле шамотного порошка, тем выше его огнеупорность. По огнеупорности и содержанию шамотного порошка мертель делится на классы: I, II и III. Мертель I класса содержит 85 % шамотного порошка и имеет огнеупорность не ниже 1730 °С. Для того чтобы вести кладку с толщиной менее 0,5 мм, шамотный порошок размалывают до размеров крупинок менее 0,5 мм. В процессе работы доменной печи в период раздувки мертель обжигается и сплавляет между собой кирпичи огнеупорной кладки.

Кладку шахты в нижней части печи (в зоне установки холодильников) делают либо на шамотно-глиняном полугустом растворе (500 литров воды на 1 м³ мертеля), либо на шамотно-глиноземистом растворе на жидком стекле. Мертель шамотно-глиноземистого раствора состоит из шамотного порошка (95 %), огнеупорной глины (5 %) и технического глинозема (10 % по отношению к смеси шамотного порошка и огнеупорной глины). Технический глинозем

содержит 98,5 % Al_2O_3 . При приготовлении раствора к мертелю добавляют 15 % растворимого стекла (Na_2SiO_4) и 25 % воды (по отношению к шамотному порошку и огнеупорной глине). Преимуществом шамотно-глиноземистого раствора является его низкая газопроницаемость. Однако применять его для кладки нижних (высокотемпературных) зон нельзя, т. к. жидкое стекло снижает огнеупорность раствора.

Кладка в неохлаждаемой части шахты (где нет холодильников) ведется как на шамотно-глиноземистом растворе на жидком стекле, так и на шамотно-глиняно-цементном растворе. Он включает шамотный порошок (80–84 %), портландцемент марки «300» или «400» (20–16 %), огнеупорную глину 4–6 % от массы шамотного порошка и цемента. К этим материалам добавляется 40–45 % воды от массы указанной смеси. Этот раствор можно применять в огнеупорной кладке, работающей при температуре не выше 1250 °С. Поэтому он называется не огнеупорным, а жароупорным.

При изготовлении кладки из углеродистых огнеупоров применяются углеродистые пасты и массы. Пастой заполняются тонкие швы (до 2 мм), а массой – толстые (до 50 мм). Паста делается из кокса (50 %) и маслопека (50 %). Маслопек состоит из пека (45 %) и антраценового масла (55 %). Масса делается из термоантрацита (52 %), кокса (34 %) и маслопека (14 %). Термоантрацит – это подверженный нагреву горячим газом до температуры 850–900 °С в течение 12–13 часов антрацит.

Антраценовое масло и пек – это продукты коксования. Кокс, используемый для приготовления паст и масс, должен иметь низкую реакционную способность, что достигается повышенной температурой коксования. Лучше использовать так называемый литейный кокс, который получается при более высоких температурах коксования, чем доменный.

Кокс для приготовления углеродистой пасты измельчают до 0,5 мм, а для приготовления углеродистых масс – до 5 мм; термоантрацит дробится до 8 мм.

4. КОНСТРУКЦИИ ХОЛОДИЛЬНИКОВ И СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

4.1. Конструкции холодильников

Охлаждение доменной печи имеет исключительно важное значение и преследует три основные цели:

- предохраняет кожу печи от воздействия высоких температур;
- способствует сохранности огнеупорной кладки печи;
- при разгаре огнеупорной кладки печи способствует образованию гарнисажа.

Холодильники, применяемые для охлаждения доменных печей, за исключением специальных (холодильники фурменных приборов и шлаковых леток), можно разделить на два вида: плитовые и коробчатые. Исследование систем охлаждения показало, что преобладающее число доменных печей в мире оборудовано коробчатыми холодильниками. Однако число печей, оснащенных плитовыми холодильниками, возрастает. Системами охлаждения с плитовыми холодильниками в Японии оборудовано более 70 % доменных печей, в США – менее 5 %, в других странах Западной Европы – более 20 %. На некоторых доменных печах в Западной Европе и в России применяют оба вида холодильников.

Коробчатые холодильники выполняются из бронзы или мягкой малоуглеродистой стали. Эти холодильники устанавливаются горизонтально в литых или сварных стальных амбразурах, закрепляемых на кожухе печи (рис. 4.1).

При вертикальной системе охлаждения применяются чугунные плитовые холодильники, конструктивно различающиеся между собой в зависимости от размещения по зонам печи. Вертикальный плитовый холодильник представляет собой чугунную плиту толщиной 120–160 мм с залитыми внутри стальными трубками диаметром 32–50 мм. Шаг между трубками делается не более 270 мм. Это связано с тем, что при большем шаге между трубками наблюдается резкое

возрастание температур в средней части холодильника между трубками, что в итоге приводит к быстрому выходу холодильника из строя. Вертикальные холодильники опоясывают кладку печи, поэтому в плане они выполняются по радиусу кожуха. Холодильники могут быть прямоугольными при установке их в цилиндрической части кожуха или трапецевидной формы – в конических частях кожуха. Холодильники отливаются из чугуна марок СЧ-15-32, СЧ-12-25, ЧЛ-3, СЧ-28. Различные виды вертикальных плитовых холодильников показаны на рис. 4.2.

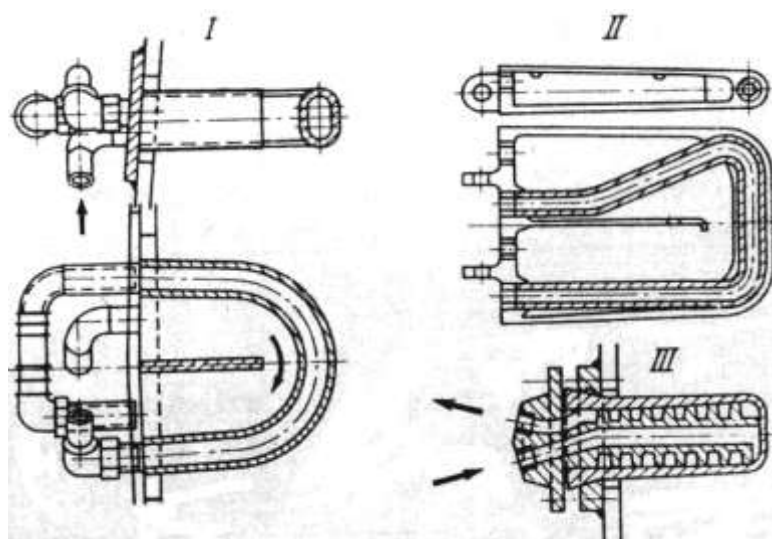


Рис. 4.1. Конструкции горизонтальных холодильников

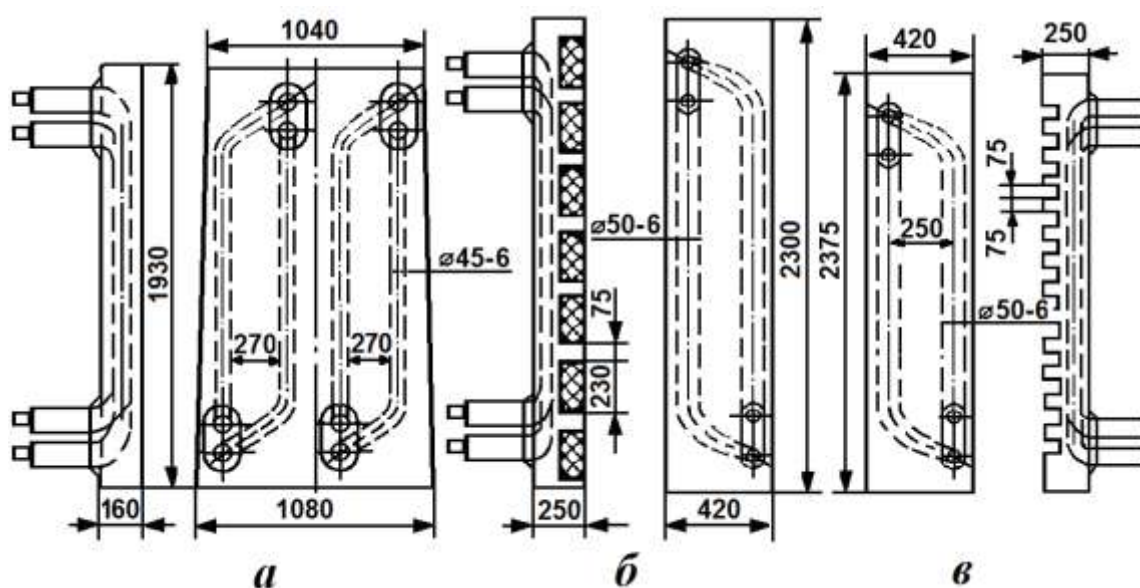


Рис. 4.2. Вертикальные плитовые холодильники: а – гладкий плитовый; б – ребристый с залитым кирпичом; в – ребристый без залитого кирпича

В отличие от холодильников с залитыми в одной плоскости четырьмя трубками или одним змеевиком, двухрядный холодильник представляет собой утолщенную плиту тех же габаритов по высоте и ширине, с залитыми в двух плоскостях перекрещивающимися змеевиками, в которых обеспечивается восходящее движение воды. Холодильник при необходимости может быть выполнен с опорным выступом в средней или верхней части плиты для поддержания кладки (рис. 4.3).

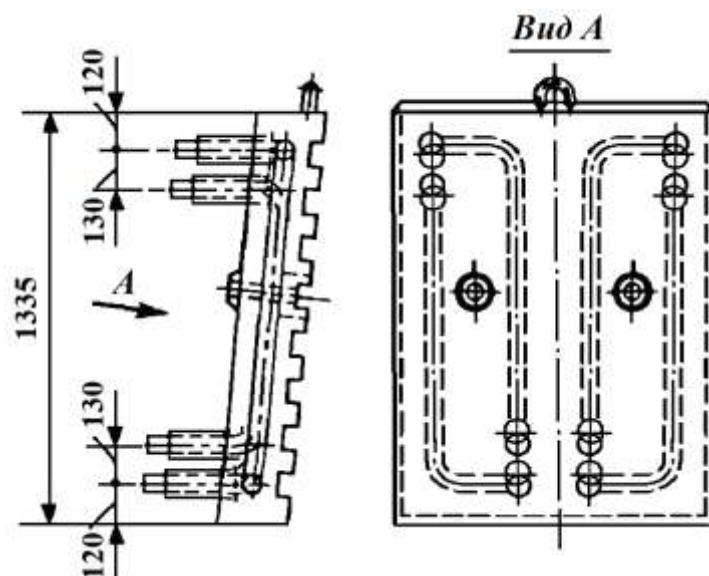


Рис. 4.3. Холодильник плитовый двухрядный с S-образной формой металлической части и опорным выступом

По периферии лещади и горна (в том числе в фурменной зоне) устанавливаются только плитовые холодильники с гладкой поверхностью для лучшего отбора тепла от кладки и уменьшения нагрева тела самого холодильника (рис. 4.4).

Конструктивно плитовые холодильники горна не отличаются от холодильников лещади; отличается лишь форма холодильников фурменной зоны (рис. 4.5). Сложная конфигурация холодильников связана с необходимостью установки арматуры устройства для подвода воздуха в печь.

В заплечиках для лучшего образования гарнисажа используются ребристые холодильники с залитым кирпичом. Прочность сцепления гарнисажа с поверхностью такого холодильника получается очень высокой, что резко

сокращает случаи его схождения в зоне заплечиков. Высота ребер делается 75–230 мм, толщина ребер составляет обычно 50–60 мм. Значительно реже в этой зоне устанавливаются гладкие холодильники, которые, хотя и более рациональны с теплотехнической точки зрения, могут быстрее выходить из строя вследствие сильного абразивного действия газового потока и трения кокса, особенно при неустойчивом гарнисаже.

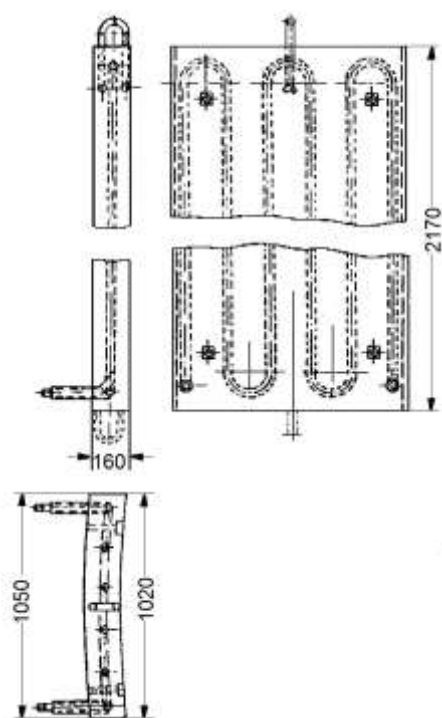


Рис. 4.4. Периферийный вертикальный плитовый холодильник лещади

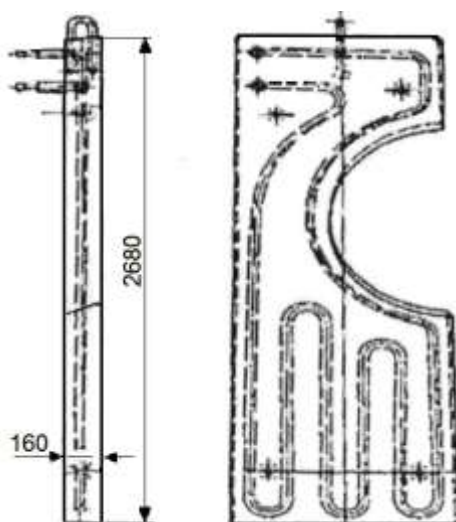


Рис. 4.5. Холодильник фурменной зоны

Для улучшения сцепления гарнисажа с поверхностью холодильника используют холодильники, которые представляют собой чугунную плиту, в которой выполнены сквозные на всю толщину горизонтальные проемы, не достигающие до конца боковых граней, для чего металлической части плиты придается S-образная форма. В проем заливается огнеупорный клиновидный кирпич или другой высококачественный материал – муллит, карборунд. В металлической части плиты, обрамляющей проемы, заливается один или два ряда охлаждающих змеевиков, имеющих также S-образную форму. Такие холодильники имеют ряд достоинств перед обычными конструкциями; в частности, отмечается снижение расхода кокса на 3–4 кг на тонну чугуна.

Область маратора защищают сапожковыми холодильниками с выступами для защиты опорного кольца или горизонтальными холодильниками, имеющими часто самостоятельное охлаждение. Сапожковые холодильники выполняют преимущественно ребристыми, с залитым кирпичом, без него, а иногда гладкими.

Холодильники из чугуна с залитым кирпичом, показанные на рис. 4.6, служат для охлаждения как запечников, так и маратора. Конструкция отличается простотой и минимальным количеством вырезов в кожухе.

В распаре и шахте применяют плитовые холодильники с залитым кирпичом и с ребрами без залитого кирпича. Холодильники верхнего ряда шахты имеют уступы величиной до 300 мм для опоры кладки неохлаждаемой части шахты. Большие абразивные воздействия на холодильники шахты должны компенсироваться оптимальным защитным слоем кирпича даже за счет некоторого ухудшения их теплопроводности и повышения теплового напряжения на холодильник.

Устройство выступов у холодильников (до 650 мм), устанавливаемых в средней части шахты (рис. 4.7), дает заметно лучшие результаты их эксплуатации, но не исключает случаев прогара и неравномерного поля охлаждения, что вызывает появление термических напряжений в кладке и нарушение ее прочности.

Для повышения стойкости чугунных плитовых холодильников в настоящее время их изготавливают из высококачественного чугуна с глобулярным графитом (ВЧ-45, ВЧ-50). Они практически полностью вытеснили плиты из низколегированного чугуна. Новые холодильные плиты имеют повышенную пластичность и прочность, а также сопротивление воздействию высоких температур. Общим для различных типов холодильных плит из чугуна является устойчивость к тепловым потокам до $60\text{--}70 \text{ кВт/м}^2$.

При более высоком уровне тепловых потоков используют медные вертикальные холодильные плиты. Общий вид вертикальных медных холодильников фирмы «Пауль Вюрт» представлен на рис 4.8 и 4.9.

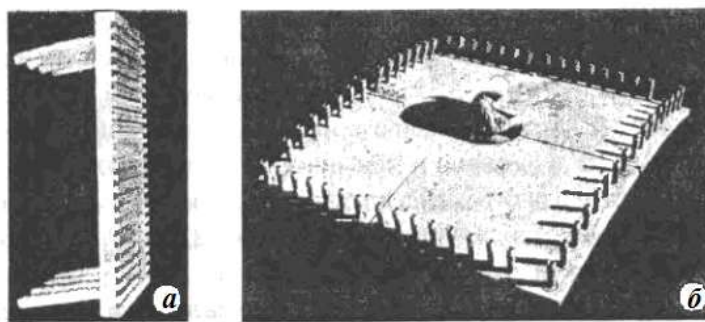


Рис. 4.8. Медные холодильники фирмы «Пауль Вюрт»:
а – для охлаждения распара, заплечиков и низа шахты; *б* – для зоны чугунной летки

Коэффициент теплопередачи между поверхностью медного холодильника и водой во много раз выше, чем между поверхностью чугунного холодильника и водой. Наряду с сокращением расхода охлаждающей воды на 30–35 %, использование медных холодильников приводит к быстрому наращиванию и восстановлению гарнисажа.

Это делает ненужным использование футеровки для защиты панелей, собранных из медных холодильников. На период задувки печи достаточно нанести слой торкрет-массы толщиной 50–75 мм, заполняющей канавки горячей стороны холодильника. Толщина медных холодильников составляет 100–130 мм.

Медный холодильник первого типа изготавливают из горячекатаного сляба, ширина и толщина которого соответствует размерам готового холодильника. Каналы охлаждения представляют собой круглые отверстия, высверлен-

ные в слябе. Такой холодильник характеризуется высокой теплопроводностью (380–385 Вт/(м·К)) по сравнению с холодильником из чугуна (45 Вт/(м·К)). Длина холодильника ограничивается возможностями оборудования для сверления каналов.

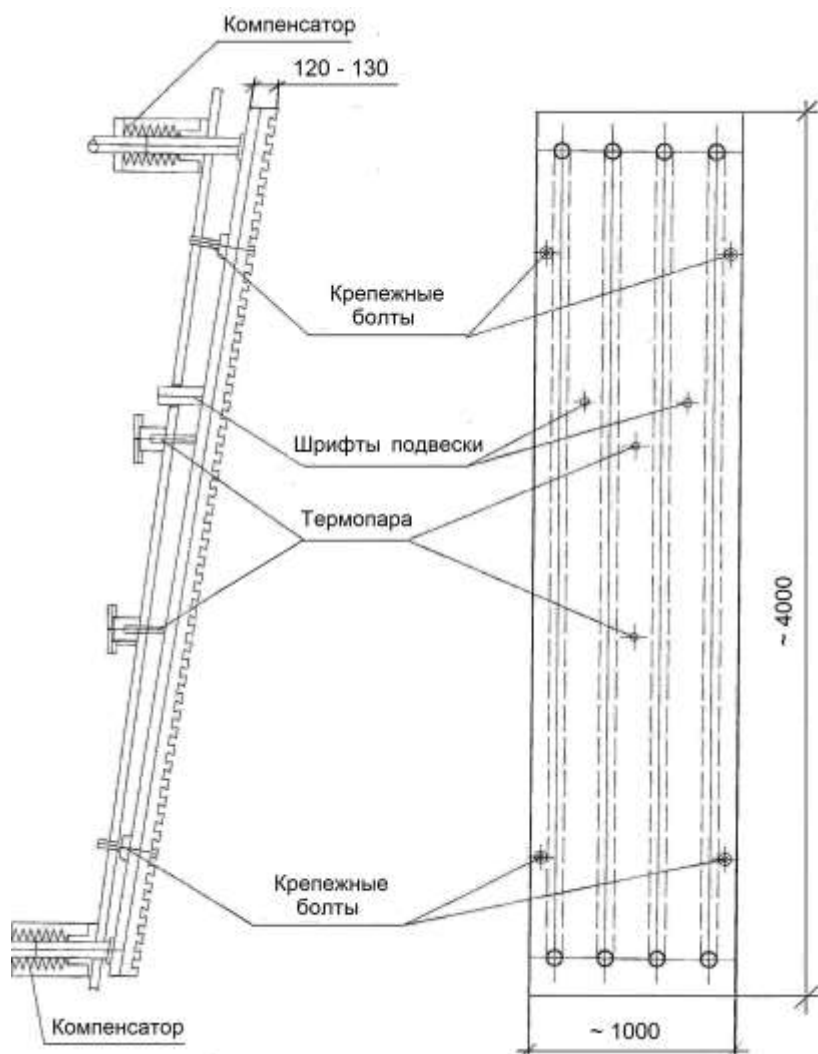


Рис. 4.9. Медные холодильные плиты ДП № 7 «НЛМК» и ДП № 5 «НТМК»

Холодильник второго типа изготавливают методом литья в форму – кристаллизатор. Для формирования каналов в кристаллизатор погружают охлаждаемые графитовые стержни. При использовании такой технологии можно изготавливать холодильники любой длины и толщины. Так, холодильники горна, не имеющие ребер и канавок, имеют толщину 80–100 мм при длине до 5 м. Холодильники заплечиков, распара и шахты с канавками и ребрами имеют тол-

щину 120–130 мм. Для усиления охлаждающего эффекта используют каналы овальной формы.

Для охлаждения заплечиков и низа шахты разработана альтернативная конструкция медных холодильников – горизонтальные кронштейновые. Такие холодильники успешно применены на доменных печах № 3 и № 4 ОАО «Северсталь» (рис. 4.10). И вертикальные и горизонтальные системы с медными холодильниками гарантируют срок службы шахты не менее 15 лет.

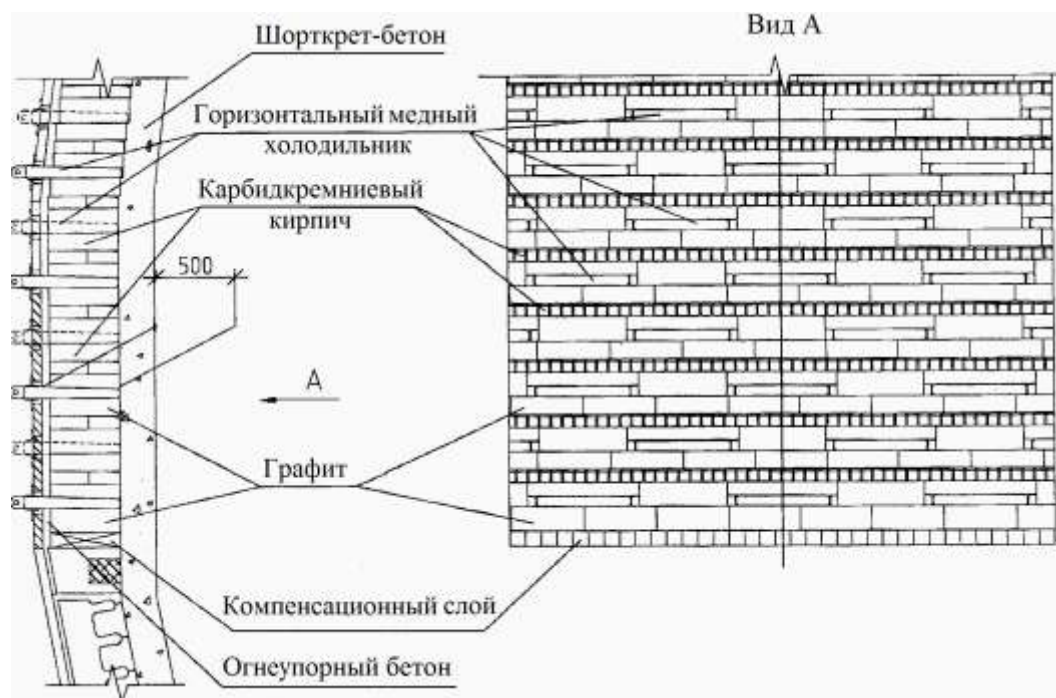


Рис. 4.10. Конструкция кладки с медными горизонтальными холодильниками

При использовании медных холодильников упрощается конструкция кожуха печи, сокращаются работы по монтажу трубопроводов, уменьшается требуемое количество охлаждающей воды, обеспечивается гладкий рабочий профиль, образуется устойчивый слой гарнисажа, работающего как эффективный теплоизолятор, при тех же размерах кожуха значительно увеличивается полезный объем печи.

4.2. Системы охлаждения доменных печей

Охлаждение по видам теплоносителя делится на два основных способа: холодной технической (иногда химически подготовленной) и кипящей (деаэри-

рованной) водой с использованием в качестве охлаждающего фактора скрытой теплоты парообразования, так называемое испарительное охлаждение.

Система охлаждения доменных печей должна работать бесперебойно. Поэтому электроснабжение насосной станции производится не менее чем от двух независимых источников. Насосные станции, кроме основных, должны быть оборудованы резервными насосами. Снабжение доменного цеха водой производится не менее чем по двум водоводам, уложенным в проходных туннелях. Каждый из водоводов рассчитывается на пропуск 100 % количества требуемой для охлаждения воды. На случай обесточивания доменного цеха устанавливаются водонапорные башни, запас воды в которых должен обеспечивать охлаждение печи до ввода в действие резервных насосов или до полной остановки печи после выпуска чугуна и шлака [4].

Водяное охлаждение печи может быть однозонным и двухзонным. В первом случае вода на все холодильники подается от одной группы насосов с напором около 0,8 МПа (8 атм). При двухзонном охлаждении доменная печь делится на две зоны – верхнюю и нижнюю соответственно с напором 0,8 и 0,5 МПа. Эти зоны работают от отдельных групп насосов. В ряде случаев для доменных печей большого объема для охлаждения деталей фурменных приборов давление воды повышается до 1,5 МПа. Для доменных печей, работающих на повышенном давлении газа, предпочтительной является однозонная система охлаждения.

Перед поступлением воды в цех она подвергается очистке в механизированных двухкамерных фильтрах.

Для защиты водного бассейна организуется замкнутый оборотный цикл водоснабжения, включающий оборотные циклы водоснабжения тонкой газоочистки доменного газа, шламов стоков бункерной эстакады и системы шихтоподачи, водоснабжения установок придоменной грануляции шлака (при их наличии в цехе). Сброс воды из замкнутых оборотных циклов водоснабжения в водный бассейн не производится.

Принципиальные схемы водяного охлаждения доменной печи различных видов показаны на рис. 4.11.

Расход воды на охлаждение доменной печи исключительно высок — в пределах 12–20 м³ на 1 тонну чугуна. Основными факторами, определяющими расход воды на охлаждение, являются качество воды, конструктивные особенности печи, тепловые условия работы охлаждающих элементов, параметры доменного процесса и гидравлические особенности системы охлаждения.

Качество воды характеризуется химическим составом и содержанием в ней механических примесей. Исключение выпадения механических примесей обеспечивается установкой фильтров и созданием самоочищающихся скоростей. Накипь образуется при выпадении химических примесей и определяется температурой нагрева воды. К химическим примесям относится бикарбонат кальция $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ и магния $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$, которые при нагреве разлагаются с образованием малорастворимых соединений CaCO_3 и MgCO_3 , выделяющихся из раствора в виде накипи, когда их концентрация превышает растворимость этих солей при данной температуре.

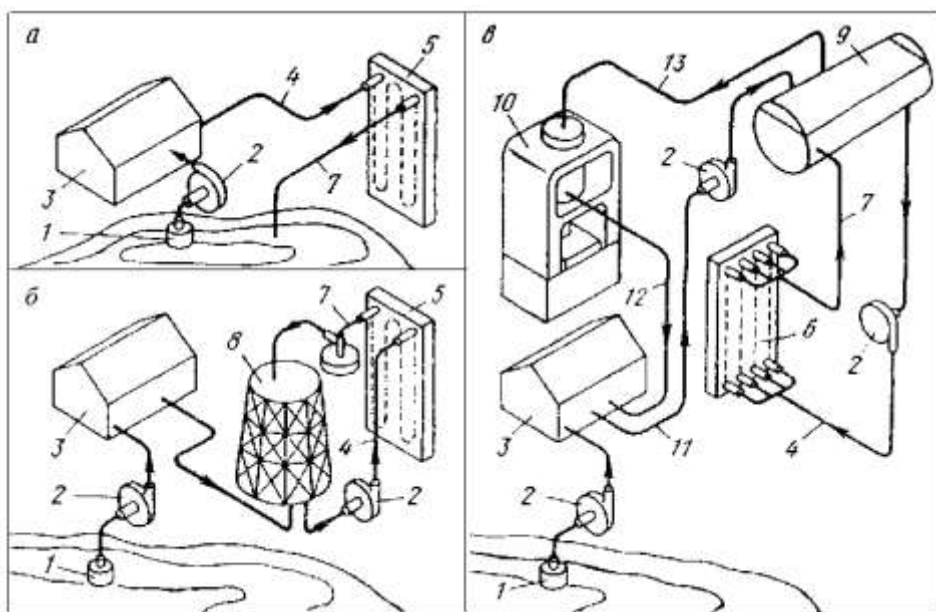


Рис. 4.11. Принципиальные схемы разомкнутого водяного (а), замкнутого водяного (б) и испарительного (в) охлаждений: 1 — водозаборный фильтр; 2 — насос; 3 — отделение водоподготовки; 4 — напорный трубопровод; 5 — холодильник водяного охлаждения; 6 — холодильник испарительного охлаждения; 7 — сливной трубопровод; 8 — градирня; 9 — бак-сепаратор; 10 — потребитель пара; 11 — питательный трубопровод; 12 — труба возврата конденсата; 13 — паровой трубопровод

В трубах холодильников выпадает в основном аморфный слой карбоната кальция, теплопроводность которого составляет $0,2\text{--}1,2 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$. В этом случае при низких плотностях теплового потока (до $10 \text{ кВт}/\text{м}^2$) температура тела холодильника повышается незначительно. При повышении значения теплового потока до $50\text{--}60 \text{ кВт}/\text{м}^2$ и более температура рабочей поверхности холодильника превышает предельно допустимую ($600\text{--}700^\circ\text{C}$), что приводит к разрушению холодильника, а в зонах контакта с жидким чугуном увеличивает возможность прорыва горна или лещади печи.

Важное значение имеет скорость воды в трубах холодильников. При нормальной работе холодильников плотность тепловых потоков не превышает $10 \text{ кВт}/\text{м}^2$, а скорость воды поддерживается на уровне $1,0\text{--}1,5 \text{ м}/\text{с}$. В этом случае поверхностное кипение воды практически исключено. При плотности тепловых потоков, достигающих $20 \text{ кВт}/\text{м}^2$, скорость воды необходимо увеличивать.

При испарительном охлаждении используется скрытая теплота парообразования для отвода тепла охлаждаемой детали (холодильника), равная $2260,9 \text{ кДж}/\text{кг}$. Кроме того, каждый 1 кг воды, поступивший в систему охлаждения с температурой $\sim 30^\circ\text{C}$, нагреваясь до кипения, отбирает примерно 293 кДж . Таким образом, при испарительном охлаждении отводится $\sim 2512 \text{ кДж}$ вместо $42\text{--}45$ (max) $\text{кДж}/\text{кг}$ при водяном охлаждении, что позволяет значительно сократить расход воды.

Оба способа охлаждения (водяное и испарительное) разделяют на горизонтальное и вертикальное. При горизонтальном охлаждении холодильники шахты, распара, заплечиков устанавливают в массиве кладки горизонтально, а при вертикальном охлаждении – вертикально по охлаждаемой поверхности, прикрепляя холодильники к внутренней стороне кожуха печи специальными болтами. Охлаждение металлоприемника и боковой поверхности лещади осуществляют только вертикальными холодильниками или наружным поливом кожуха.

Преимущества горизонтальной системы охлаждения заключаются в большой поверхности охлаждения, достигающей $3 \text{ м}^2/\text{м}^3$ кладки, возможности смены холодильников в межремонтные периоды, лучшей сохранности проектного профиля и соотношений его размеров. Горизонтальные холодильники охлаждают кладку печи на большую глубину и тем самым способствуют сохранности огнеупорной кладки.

Недостатками горизонтальной системы охлаждения являются плохая герметичность кожуха печи и его ослабление вырезами для холодильников, относительная легкость прогара холодильников при обнажении их по мере износа кладки или оползания гарнисажа. При использовании несменяемых горизонтальных холодильников кожух печи практически не ослабляется, они хорошо сопрягаются с огнеупорной кладкой, но возникают проблемы с обнаружением их прогара. Кроме того, при температурном росте кладки такие холодильники передают значительные напряжения на кожух печи.

Вертикальные плитовые холодильники устанавливаются между кожухом печи и огнеупорной кладкой и крепятся к кожуху с помощью болтов. Главное назначение таких холодильников – предохранение кожуха печи от воздействия высоких температур. Повысить стойкость кладки такие холодильники могут настолько, насколько простирается их охлаждающее действие в массив кладки. Чем выше теплопроводность огнеупорной кладки, тем в большей степени такие холодильники способствуют ее стойкости. При применении вертикальных холодильников кожух печи имеет лучшую строительную прочность, поскольку не ослаблен вырезами, высокую герметичность, но имеет меньшую площадь охлаждения – примерно $2 \text{ м}^2/\text{м}^3$ кладки.

Для сокращения на печи разводки линий, подводящих охлаждающую воду, и для лучшего ее использования холодильники, как правило, соединяются в секции. Число холодильников в секции определяется теплонапряженностью данной зоны печи и зависит также от конструкции футеровки печи.

Ряд участков печи и охлаждающих приборов находятся на индивидуальном питании. К ним относятся горновые леточные холодильники, детали фурменного и шлакового приборов, подвергающиеся особо интенсивному нагреву. Температурный перепад воды в холодильниках металлоприемника и лещади составляет лишь 2–4 °С (согласно ПБ11-542-03 [4] не должен превышать 3 °С), в воздушных фурмах – 3–5,5 °С. Температурный перепад воды при охлаждении шлаковой летки обычно достигает 9 °С. В зонах секционного охлаждения на холодильниках распара и шахты перепад температур воды на входе и выходе составляет обычно 6–12 °С. Самый высокий температурный перепад наблюдается для фурменной зоны – 10–12 °С, а температура отходящей охлаждающей воды на выходе в этой зоне может достигать 35–50 °С.

Во всех случаях температура воды, отходящей от водоохлаждаемых элементов, должна быть ниже температуры выпадения жесткости. Температурные перепады воды для отдельных охлаждаемых элементов печи и предельное значение температуры воды устанавливаются технологической инструкцией для конкретных печей.

Для настоящего времени характерен переход на замкнутые системы охлаждения с использованием химически очищенной воды и теплообменников для охлаждения этой воды. Впервые в России эта технология охлаждения была использована на доменной печи № 3 «Тулачермет». При этом доменная печь была оборудована холодильными плитами до верха шахты, а охлаждение в замкнутом контуре применено для заплечиков и шахты печи. Для этого была сооружена дополнительная насосная с теплообменниками типа *вода/вода*. На теплообменники подавалась вода от существующего оборотного цикла. Эта схема применена в проектах доменных печей № 3 и № 4 ОАО «Северсталь», где охлаждение химически очищенной водой реализовано по всей высоте печи (рис. 4.12).

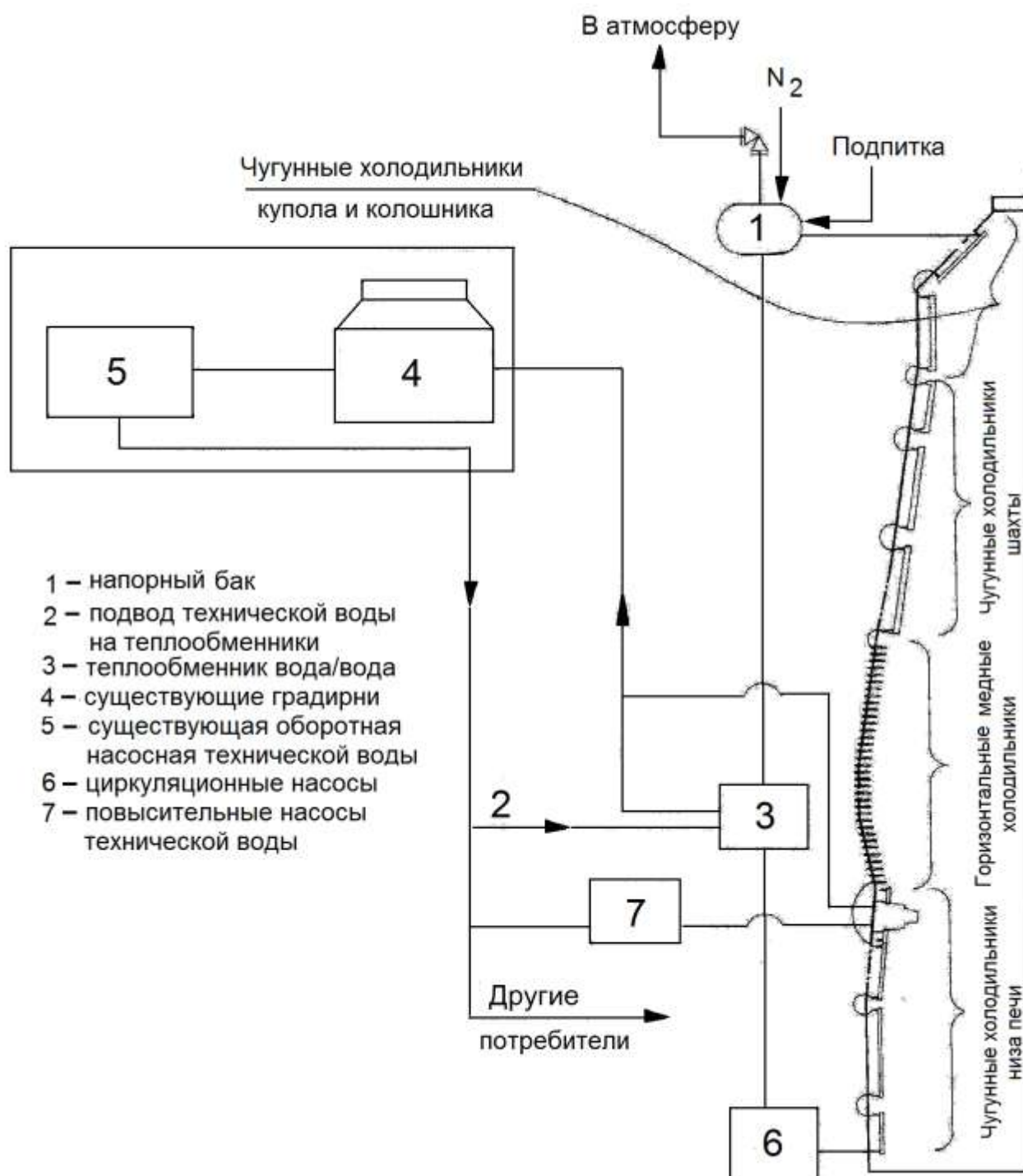


Рис. 4. 12. Система охлаждения химически очищенной водой по всей высоте печей № 3 и № 4 ОАО «Северсталь»

На доменной печи № 5 ОАО «ЕВРАЗ-НТМК» установлена система испарительного охлаждения в замкнутом контуре без теплообменников с использованием циркуляционных насосов. Использование циркуляционных насосов обеспечивает равномерное восходящее движение воды и равномерный тепло-

съем с холодильных плит шахты и заплечиков. Горны печей № 5 и № 6 ОАО «ЕВРАЗ-НТМК», а также ДП № 1 «Мечел» охлаждаются наружным поливом кожуха (рис. 4.13).

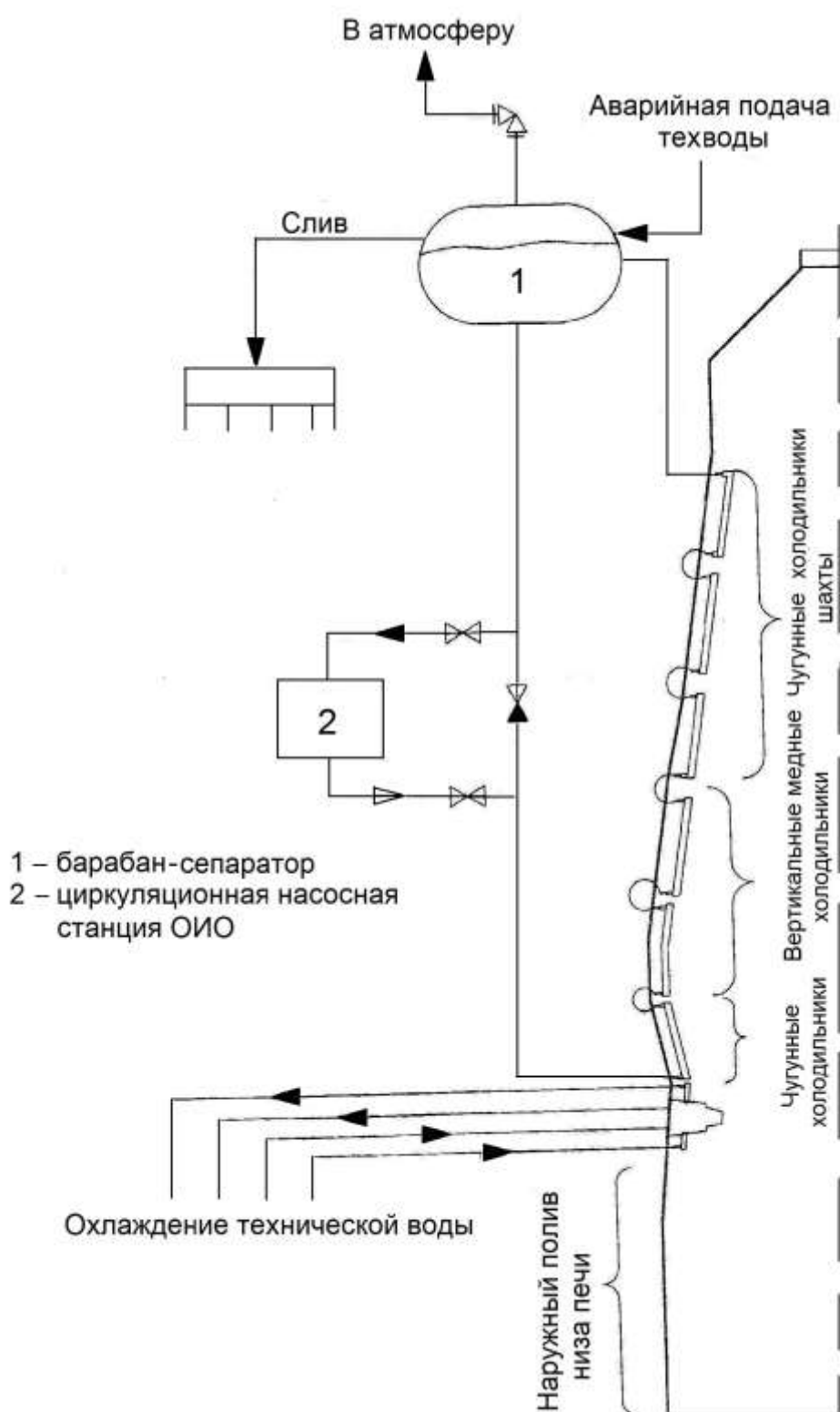


Рис. 4.13. Система испарительного охлаждения заплечиков, распара и шахты ДП № 5 и № 6 ОАО «ЕВРАЗ-НТМК»

Испарительную систему охлаждения в настоящее время применяют преимущественно для верхнего строения печи – шахты, распара, иногда заплечиков. Лещади и горн, а также воздушные фурмы и шлаковые приборы оборудуют водяным охлаждением.

4.3. Охлаждение лещади

Одна из ответственных деталей доменной печи – лещади – имеет особый вид охлаждения. От боковой поверхности ее массива тепло отводится с помощью периферийных вертикальных плитовых холодильников. Охлаждение низа лещади, так называемое подлещадное охлаждение, производится путем установки в этой зоне материала с высокой теплопроводностью (футеровка графитом, графитированными плитами, высокотеплопроводными набойками), интенсивно передающего отобранное тепло от центра лещади к водоохлаждаемой периферии, а также воздуху (в зарубежной практике – иногда к воде или маслу).

В России применяется в основном воздушное охлаждение лещади. Конструкция такого охлаждения имеет несколько вариантов. Один из вариантов воздушного охлаждения лещади, впервые использованный в 1956 г. на доменной печи с полезным объемом 1310 м³ Кузнецкого металлургического комбината, показан на рис. 4.14. Система подлещадного охлаждения включает четыре пучка цельнотянутых труб, уложенных с переменным шагом, меньшим в середине и большим на периферии для улучшения отбора тепла в центре лещади. Диаметр труб составляет 168 и 114 мм. Подача воздуха в трубы осуществляется двумя вентиляторами среднего давления. Каждый вентилятор охлаждает половину лещади. Температура охлаждающего воздуха повышается на 5 °С, а количество отводимого тепла от лещади достигает 290 МДж/ч.

Другой тип конструкции охладителя лещади, разработанный институтом «Гипросталь», предусматривает подачу воздуха вентилятором в основной канал с последующим распределением по каналам, образованным слябами (рис. 4.15).

Следующая конструкция холодильников лещадь, разработанная институтом «Гипросталь» (рис. 4.16), предусматривает подвод воздуха по каналу в фундаменте к центру основания лещадь. По радиально уложенным слябам воздух движется от центра к периферии с расчетом наибольшего охлаждения средней части массива лещадь.

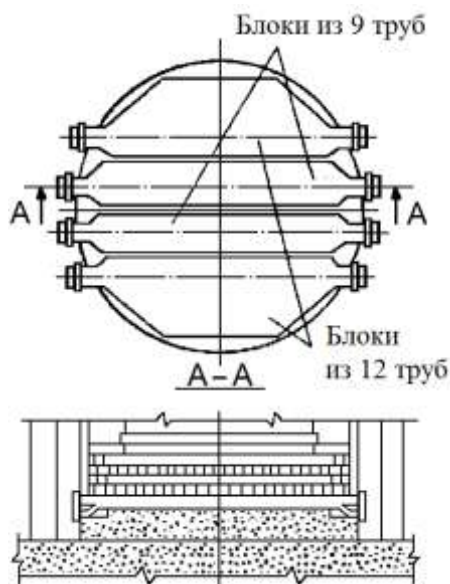


Рис. 4.14. Схема воздушного охлаждения лещадь конструкции КМК

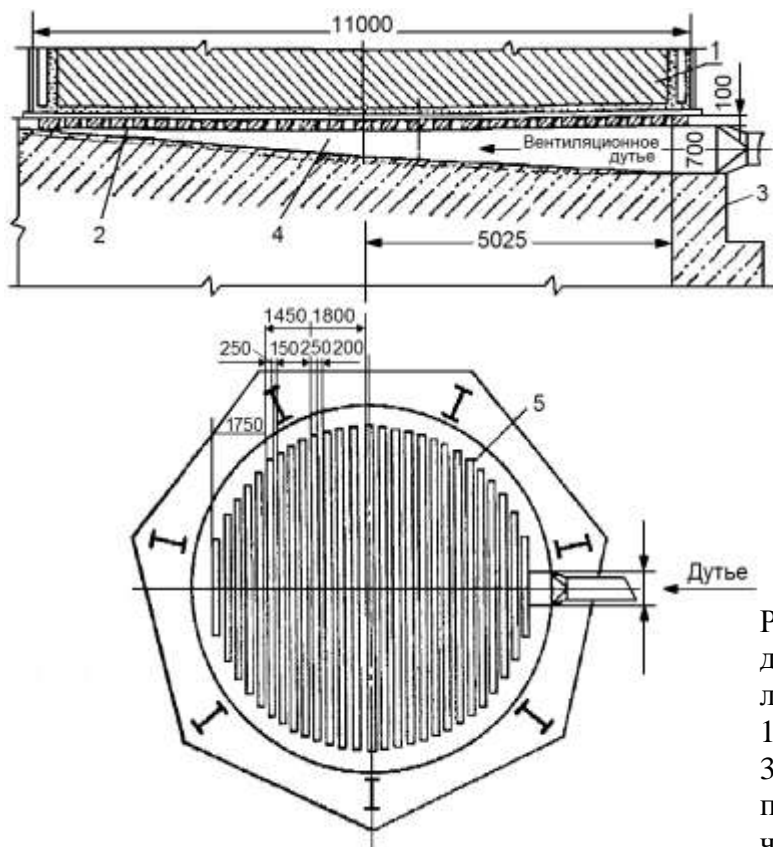


Рис. 4.15. Схема воздушного охлаждения лещадь с параллельными каналами:

1 – лещадь; 2 – металлическое днище; 3 – фундамент; 4 – центральный распределительный канал; 5 – металлические бруски (250x100 мм)

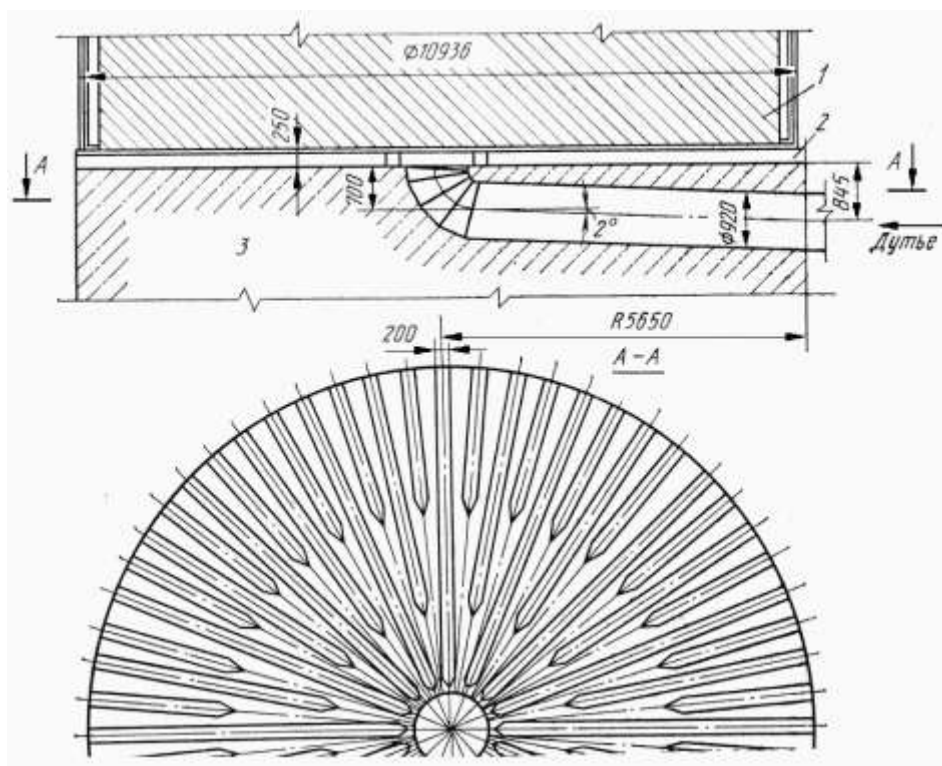


Рис. 4.16. Схема воздушного охлаждения лещади с центральной подачей воздуха:
1 – лещадь; 2 – металлические бруски (250х200 мм); 3 – фундамент

Система охлаждения лещади, разработанная институтом «Гипромез», состоит из чугунных плит толщиной 180 мм с залитыми в них трубками диаметром 114х7 мм и расстоянием между ними 165 мм. Подвод и отвод воздуха осуществляют через специальные коллекторы.

4.4. Уход за охлаждающей системой доменной печи

Устройства, служащие для охлаждения доменной печи, представляют собой довольно сложную систему и могут быть разделены на следующие отдельные участки: холодильники металлоприемника – бронеовые плитовые холодильники горна, холодильники фурменной зоны, чугунной и шлаковой леток, воздухоподводящих устройств (фурмы, фурменные холодильники), холодильники заплечиков, шахты, трубы для наружного полива различных частей печи в особых случаях, холодильные устройства арматуры воздухонагревателей, шлаковых стопоров.

Надзор за исправностью холодильников является важнейшей обязанностью технологического персонала печи.

Уход за охлаждающей системой заключается в следующем:

- надзор за нормальным питанием водой всей охлаждающей системы;
- надзор за температурой отходящей воды;
- смена фильтров, служащих для очистки поступающей на охлаждение воды;
- периодическая промывка холодильников;
- обнаружение сгоревших холодильников и своевременная их замена в целях предотвращения попадания в печь большого количества воды.

Надзор за охлаждающими устройствами в смене осуществляется сменным водопроводчиком, который должен проверять работу всех холодильников и охлаждающих приборов. Он должен также фиксировать температуру воды из исходящих трубок охлаждающих устройств. Результаты измерений записываются в журнал о работе печи.

Кроме сменных водопроводчиков проверку работы охлаждающих устройств производят общецеховые водопроводчики во главе с водопроводным мастером, которые осуществляют эту работу по определенному графику. В их обязанности входит следующее:

- промывка холодильников и охлаждающих приборов;
- опрессовка подозрительных в отношении прогара холодильников.

Очень важным является систематическое наблюдение за состоянием горновых холодильников, поскольку их выход из строя может привести к прорыву горна – одной из самых тяжелых аварий в доменном производстве, когда контакт охлаждающей воды с жидким чугуном сопровождается взрывами большой мощности с выбросом продуктов плавки и раскаленных масс кокса.

Наблюдение за исправностью холодильников включает прежде всего надзор за непрерывностью подачи в них воды. Причинами сокращения подачи воды может быть забивка кранов, стояков, трубок или колен. Устранение отме-

ченных неполадок производится посредством подачи сжатого воздуха или воды под высоким давлением.

Прекращение поступления воды в холодильник горна может быть признаком его прогара. В этом случае из исходящей трубки холодильника выделяется газ, воспламеняющийся от горящего факела. Тогда подачу воды в холодильник нужно немедленно остановить. Далее холодильник подвергается опрессовке под избыточным давлением 8 атмосфер в течение 5 минут. Убедившись в прогаре холодильника, нужно немедленно произвести выпуск чугуна и шлака и подготовить печь к аварийному ремонту.

При обнаружении прогара броневых холодильников в области фурменной зоны, заплечиках или распаре они отключаются от водовода, охлаждающие трубки заливаются огнеупорной массой или цементом. В районе прогара холодильника ставятся брызгала для внешнего полива кожуха.

Определенную сложность вызывает поиск сгоревшего холодильника. Для его розыска необходимо последовательно отключать от водоподводящей сети холодильник за холодильником, проверяя каждый из них в отдельности. Наилучшие результаты в отношении розыска сгоревшего холодильника дает опрессовка холодильников водой под большим давлением. Для этой цели подозрительный холодильник выключают из общей сети и включают в сеть с прессом. При помощи пресса давление в сети повышается до 8–10 атмосфер. Если холодильник исправный, давление, достигнув максимального значения, остается без изменений. Если холодильник дает течь, то давление падает, показывая тем самым, что холодильник воду «не держит».

При недостаточной интенсивности охлаждения холодильника, а также при сильном разгаре огнеупорной кладки перед ним наблюдается покраснение брони. В случае недостаточной интенсивности охлаждения нужно повысить давление воды. Если это не достигает цели (к примеру, из-за засорения холодильников), необходимо промыть холодильник либо подачей в него воды высокого давления, либо раствором соляной кислоты.

При наблюдении за исправностью холодильников необходимо систематически следить за давлением воды в водоводе. Падение давления воды может быть вызвано засорением фильтров, задвижек, водовода или неполадками на насосной станции. При понижении давления воды необходимо немедленно установить причину. Для этого прежде всего нужно сверить показания манометров, указывающих давление воды до фильтров и после них. Если на участке фильтров перепад давления нормальный (не более 0,5 атм), то падение давления воды может происходить из-за неполадок на насосной станции. При засорении или повреждении основного водовода подачу воды в цех необходимо переключить на запасной водовод. При этом переключении нельзя допускать гидравлического удара. При засорении фильтра водовод переключается на резервный фильтр. После этого необходимо очистить сетку фильтра, собрать камеру и оставить этот фильтр в резерве. Известно, что засорение фильтров чаще всего происходит весной, когда речная вода содержит много ила и речной молодежи.

Следует отметить, что к концу кампании доменной печи холодильники шахты, распара и заплечиков чаще всего выходят из строя и для поддержания функций охлаждения приходится переходить на охлаждение кожуха печи наружным поливом. Однако длительная работа печи в таком режиме охлаждения крайне нежелательна. Помимо неизбежного роста удельного расхода кокса из-за больших тепловых потерь, происходит коррозия кожуха и уменьшение его толщины. Это создает аварийную обстановку и может привести к разрыву кожуха шахты.

5. КОНСТРУКЦИИ ОТДЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

5.1. Устройство лещади и горна

Конструкция отдельных частей печи обусловлена различными воздействиями на огнеупорную кладку. Лещадь современных доменных печей выполняется из углеродистого и высокоглиноземистого материала.

Ремонт лещади возможен только во время капитального ремонта I разряда, т. е. через 10–15 и более лет эксплуатации. В связи с длительностью работы лещади в присутствии указанных в п. 3.1 разрушающих воздействий ее конструкция, монтаж, последующая сушка и правила эксплуатации имеют исключительно важное значение.

Лещадь доменной печи (за исключением малых доменных печей старой конструкции) выполняется с донным охлаждением. Кладку лещади выполняют или цельноуглеродистой, или комбинированной.

До начала огнеупорной кладки лещади должны быть выполнены следующие работы:

- устанавливаются перекрытия на уровне воздушных фурм или мараторного кольца;
- производится монтаж и испытание холодильников, устанавливаемых до отмеченного выше уровня;
- зазоры между холодильниками заполняются чугуновой замазкой;
- на пень фундамента устанавливаются плиты воздушного охлаждения лещади. Зазор между плитами и фундаментом (обычно 15–20 мм) заполняется песчано-цементным раствором.

Далее производится монтаж элементов собственно доменной печи.

На металлическое днище (донышко) кожуха печи укладывается основание лещади из слоя углеродистого бетона толщиной не более 90 мм. В качестве основания лещади допускается использование графитированных пластин, укладка которых производится на углеродистой пасте. Допускается также выпол-

нение основания лещади из строганных металлических листов, зазоры между которыми заполняются углеродистой массой.

В том случае, когда доменная печь имеет цельноуглеродистую лещадь, ее кладка выполняется из двух нижних рядов графитированных и углеродистых блоков и двух рядов (верхних) из алюмосиликатных изделий (рис. 5.1).

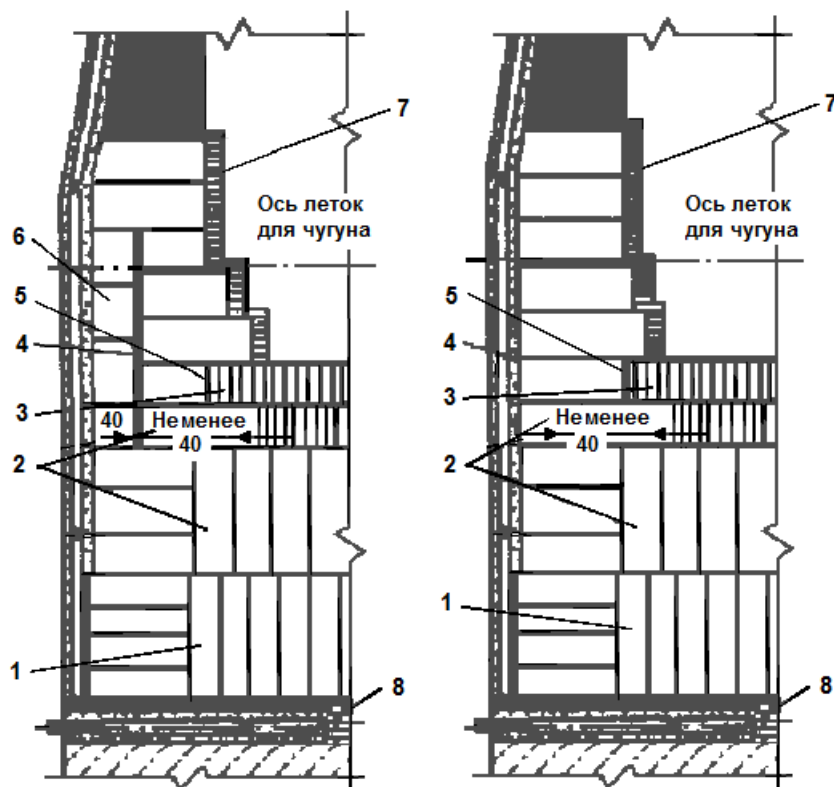


Рис. 5.1. Кладка цельноуглеродистой лещади доменной печи:
1 – графитированные блоки; 2 – углеродистые блоки; 3 – высокоогнеупорные муллитовые изделия; 4 – углеродистая масса повышенной теплопроводности; 5 – углеродистая масса; 6 – углеродистые блоки (вертикальные) повышенной теплопроводности; 7 – шамотные изделия; 8 – плиты воздушного охлаждения лещади

Нижний ряд лещади выкладывается из графитированных блоков: центр лещади – из прямоугольных вертикальных блоков высотой 1600 мм, периферия – из горизонтальных. Второй ряд лещади выкладывается из вертикальных углеродистых блоков высотой 1650 мм, периферия – из горизонтальных и вертикальных трапециевидных блоков. Графитированные блоки всегда устанавливают в основании лещади, так как они имеют более высокую теплопроводность и прочность.

Верхние два ряда периферийных углеродистых блоков лещади (при двух-кольцевой кладке) выкладываются из двух колец с оставлением зазора между ними 40 мм. Внутреннее кольцо выкладывается из горизонтальных углеродистых блоков, наружное – из вертикальных трапецевидных углеродистых блоков повышенной теплопроводности. Зазор 40 мм заполняется углеродистой массой повышенной теплопроводности. При однокольцевой кладке верхние два ряда периферийных углеродистых блоков выкладываются из одного кольца.

Блоки выкладывают на углеродистой пасте, подогретой до 30–50 °С. Толщина вертикальных швов не должна превышать 2,5 мм, горизонтальных – 1,2 мм. Между углеродистой кладкой лещади и периферийными плитовыми холодильниками оставляется зазор:

- в районе графитированных блоков для доменных печей объемом до 1800 м³ – 100 мм, для печей объемом 2000–3200 м³ – 120 мм;
- в районе углеродистых блоков для доменных печей объемом до 1800 м³ – 120 мм, 2000 м³ – 130 мм, 2700–3200 м³ – 140 мм.

Для доменных печей объемом 5000–5500 м³ величина зазоров определяется на основе расчетов [6]. Зазоры заполняются углеродистой массой повышенной теплопроводности.

Кладка комбинированной лещади выполняется из углеродистых изделий в нижней ее части и периферии и из алюмосиликатных изделий в центре (рис. 5.2). Нижняя часть лещади выполняется из графитированных блоков. Между углеродистой кладкой лещади и периферийными плитовыми холодильниками оставляется зазор 120 мм, заполняемый углеродистой массой повышенной теплопроводности.

Кладку центральной части лещади над углеродистыми блоками производят из высокоогнеупорных муллитовых изделий марки МЛЛД. Толщина радиальных и междурядных швов не должна превышать 0,5 мм, а кольцевых – 0,75 мм. Для кладки высокоглиноземистых огнеупоров применяют раствор жидкой консистенции из муллитового пластифицированного мертеля.

Между углеродистыми блоками и алюмосиликатной кладкой лещади оставляется зазор 40 мм, забиваемый углеродистой массой. Этот зазор должен перекрываться вышележащим рядом углеродистых блоков или рядом алюмосиликатной кладки.

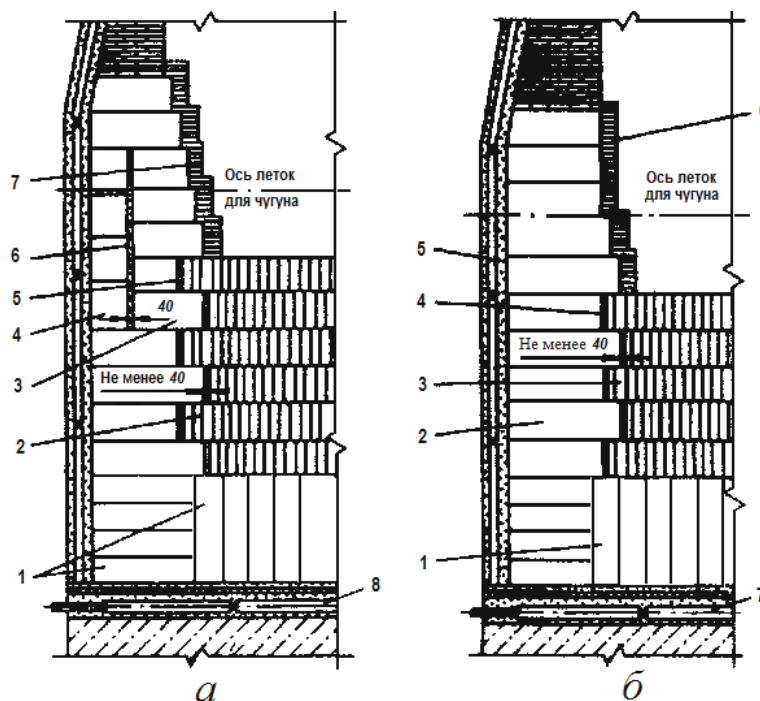


Рис. 5.2. Кладка комбинированной лещади доменной печи:

а – лещадь комбинированная; 1 – графитированные блоки; 2 – высокоогнеупорные муллитовые изделия; 3 – углеродистые блоки; 4 – углеродистые блоки (вертикальные) повышенной теплопроводности; 5 – углеродистая масса повышенной теплопроводности; 6 – углеродистая масса; 7 – шамотные изделия; 8 – плиты воздушного охлаждения лещади;

б – лещадь комбинированная; 1 – графитированные блоки; 2 – углеродистые блоки; 3 – высокоогнеупорные муллитовые изделия; 4 – углеродистая масса; 5 – углеродистая масса повышенной теплопроводности; 6 – шамотные изделия; 7 – плиты воздушного охлаждения лещади

Кладку лещади ведут с обязательной перевязкой вертикальных швов, что достигается смещением кирпичей вышележащего ряда по отношению к кирпичам нижележащего ряда на определенный угол.

Наличие подлещадного охлаждения обеспечивает надежную эксплуатацию с практической ликвидацией прорывов горна. При цельноуглеродистой лещади благодаря высокой теплопроводности углеродистых и, особенно, графитированных блоков температура кладки на глубине 1150 мм от поверхности составляет 540–760 °С.

Наряду с воздушным охлаждением лещади на доменных печах большого объема иногда применяют водяное охлаждение (доменная печь № 7 «НЛМК», № 4 ОАО «Северсталь» и др.). На доменной печи в Швельгерне (ФРГ) с горном диаметром 14 м толщина лещади составляет 2 м, охлаждение проводят водой, циркулирующей по трубам, уложенным в слое графита. Количество отводимого тепла составляет 5 млн. кДж/ч.

Лещадь доменной печи фирмы «Юзинор» в Дюнкерке (Франция) с горном диаметром 14,2 м выполнена трехслойной: низ лещади – шамотом, средняя часть – клиновидными углеродистыми блоками и верхняя – муллитом. Между шамотом и фундаментом помещены плиты воздушного охлаждения, а между шамотом и углеродистыми блоками – трубы с циркулирующим по ним маслом с температурой 300 °С при атмосферном давлении.

В Хамборне (ФРГ) на печи с диаметром горна 9,4 м расчетная высота кладки лещади составляет 1,2 м при глубине «мертвого» слоя также 1,2 м. Кладка лещади состоит из блоков аморфного углерода теплопроводностью 12,6–21,0 кДж/(м·ч·К). Печь имеет испарительное периферийное охлаждение с двойным кожухом и воздушное охлаждение для низа лещади с расходом воздуха 35000–40000 м³/ч.

Изотерма затвердевания чугуна (1150 °С) формируется в массиве лещади тем выше, чем интенсивнее ее охлаждение. Это предохраняет лещадь от так называемого осевого прогрева – наиболее тяжелого вида аварий в доменном производстве. Дополнительной защитой лещади служит глубина зумпфа (расстояние от оси чугунной летки до поверхности лещади), так называемого «мертвого» слоя чугуна. Глубина его принимается в размере 20 % диаметра горна.

Таким образом, использование огнеупоров с высокой теплопроводностью и высокая интенсивность охлаждения позволяют увеличить стойкость лещади при одновременном уменьшении ее высоты. Устройство лещади доменных печей непрерывно совершенствуется по мере появления новых огнеупоров и технических решений по улучшению ее охлаждения.

Во время ремонта печи при кладке лещади с промежуточного уровня верхний ряд существующей лещади выравнивается, проверяется и принимается так же, как поверхность ряда кладки при строительстве печи. Выбоины, сколы и трещины в верхнем ряду старой лещади не допускаются.

В том случае, когда на доменной печи осуществляется водяное (проточное) охлаждение, зазоры между периферийными плитовыми холодильниками и кожухом печи после выполнения кладки заполняются под давлением шамотно-глинисто-цементным раствором жидкой консистенции. При испарительном охлаждении эти зазоры заполняются раствором, состав которого устанавливается проектом. Допускается заполнение зазора между плитовыми холодильниками и кожухом печи специальной пластической массой, наносимой на наружную поверхность плитового холодильника перед его установкой, или специальными огнеупорными материалами, обладающими высокими теплоизоляционными свойствами и обеспечивающими газоплотность зазора.

Стены горна от уровня лещади до уровня шлаковых леток выкладывают из углеродистых блоков трапецевидной формы и алюмосиликатных кирпичей с соблюдением тех же требований, что и при кладке лещади. Углеродистая кладка стен горна выполняется как двухкольцевой, так и однокольцевой конструкции (рис. 5.3).

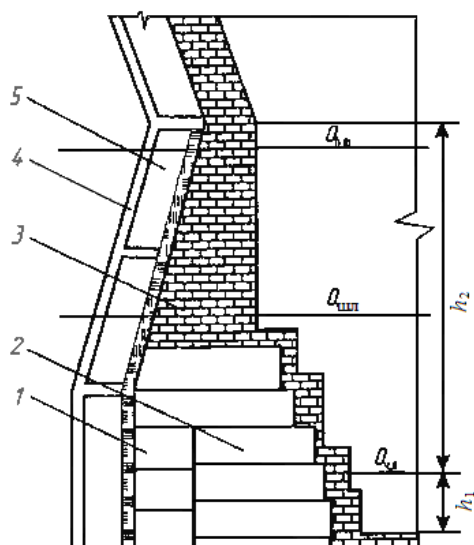


Рис. 5.3. Конструкция горна доменной печи:
1 – углеродистые блоки повышенной теплопроводности; 2 – углеродистые блоки; 3 – шамотный кирпич; 4 – углеродистая масса; 5 – периферийные плитовые холодильники; $O_{вф}$ – ось воздушных фурм; $O_{шл}$ – ось шлаковой летки; $O_{чл}$ – ось чугунной летки; h_1 – высота «мертвого» слоя; h_2 – высота горна

При двухкольцевой конструкции нижняя часть стен выкладывается из двух колец углеродистых блоков с оставлением зазора между ними величиной 40 мм. Внутреннее кольцо выполняется из горизонтальных углеродистых блоков, наружное – из вертикальных трапециевидных углеродистых блоков повышенной теплопроводности. Зазор 40 мм заполняется углеродистой массой.

Выше двухкольцевой кладки до уровня шлаковых леток устанавливается два ряда горизонтальных углеродистых блоков (рис. 5.3).

При однокольцевой конструкции кладка стен горна до уровня шлаковой летки выполняется из одного кольца горизонтальных углеродистых блоков.

Для доменных печей объемом менее 1000 м³ допускается выполнение стен горна целиком из алюмосиликатных изделий.

Ось горна печи устанавливается с помощью геодезических инструментов, причем смещение оси шахты от оси печи горна не должно превышать 30 мм.

До начала кладки стен горна зазоры между периферийными плитовыми холодильниками и рамами чугунных леток, амбразурами шлаковых леток и фурменных приборов должны быть забиты чугунной замазкой. Между углеродистой кладкой стен горна и периферийными плитовыми холодильниками оставляется зазор 120 мм для печей объемом до 1800 м³, 130 мм – для печей 2000 м³, 140 мм – для печей 2700–3200 м³. Для доменных печей объемом 5000–5500 м³ величина зазоров определяется проектом на основании специальных расчетов. Зазор заполняется углеродистой массой повышенной теплопроводности (табл. 5.1).

Таблица 5.1

Углеродистая набивная масса МТНС-2А фирмы Mayerton

Показатели	Ед. изм.	Стандартные значения
C _{св}	%	≥ 88
Содержание летучих	%	9–12
Зольность	%	≤ 8
Объемная плотность	г/см ³	≥ 1,60
Прочность на сжатие (200 °С x 24 часа)	МПа	≥ 6
Теплопроводность (800 °С)	Вт/(м·К)	≥ 10

Выше оси шлаковых леток кладку стен горна выполняют шамотным кирпичом класса А, так как углеродистые блоки в фурменной зоне будут подвергаться окислению. По этой же причине стены горна в местах расположения проемов чугунных и шлаковых леток выкладывают шамотным кирпичом. Кладка ведется на шамотно-глинистом растворе.

Первый ряд кладки из шамотных изделий укладывается на поверхность углеродистых блоков на углеродистой пасте. Все радиальные и кольцевые швы в смежных рядах кладки выполняются вперевязку. Поверхности крайних колец кладки, обращенных внутрь горна и к кожуху, не выравниваются.

Для защиты углеродистых блоков горна от окисления во время сушки и задувки печи их предохраняют защитной кладкой толщиной 230 мм из некондиционных шамотных изделий. Защитная кладка выполняется сразу после окончания кладки углеродистых блоков и ведется без притески вплотную к углеродистым блокам на шамотно-глинистом растворе.

Кладка стен областей чугунных леток выполняется из шамотных изделий на шамотно-глинистом растворе из мертеля марки МШ-42 при толщине швов 0,5 мм (рис. 5.4).

Кладка из шамотных изделий выполняется впритык к леточным холодильникам. При использовании безводной леточной массы кладка выполняется из углеродистых блоков на углеродистой пасте при толщине швов 0,5 мм. Для обеспечения газоплотности между кладкой проемов чугунной летки из углеродистых блоков и леточными холодильниками оставляется зазор величиной 50 мм, забиваемый углеродистой массой. Кладка внутри рамы для чугуна производится раньше, чем для соответствующих по высоте рядов горна. Кладка выполняется из двух рядов шамотных изделий ШПД-42.

Кладка в районе шлаковой летки и воздушных фурм выполняется из шамотных изделий на шамотно-глинистом растворе. Зазор между кладкой и периферийными холодильниками заполняется углеродистой массой. При кониче-

ской форме кожуха горна толщина кладки горна изменяется от лещади до заплечиков с 2200–1450 мм до 345 мм, т. е. до толщины стен заплечиков.

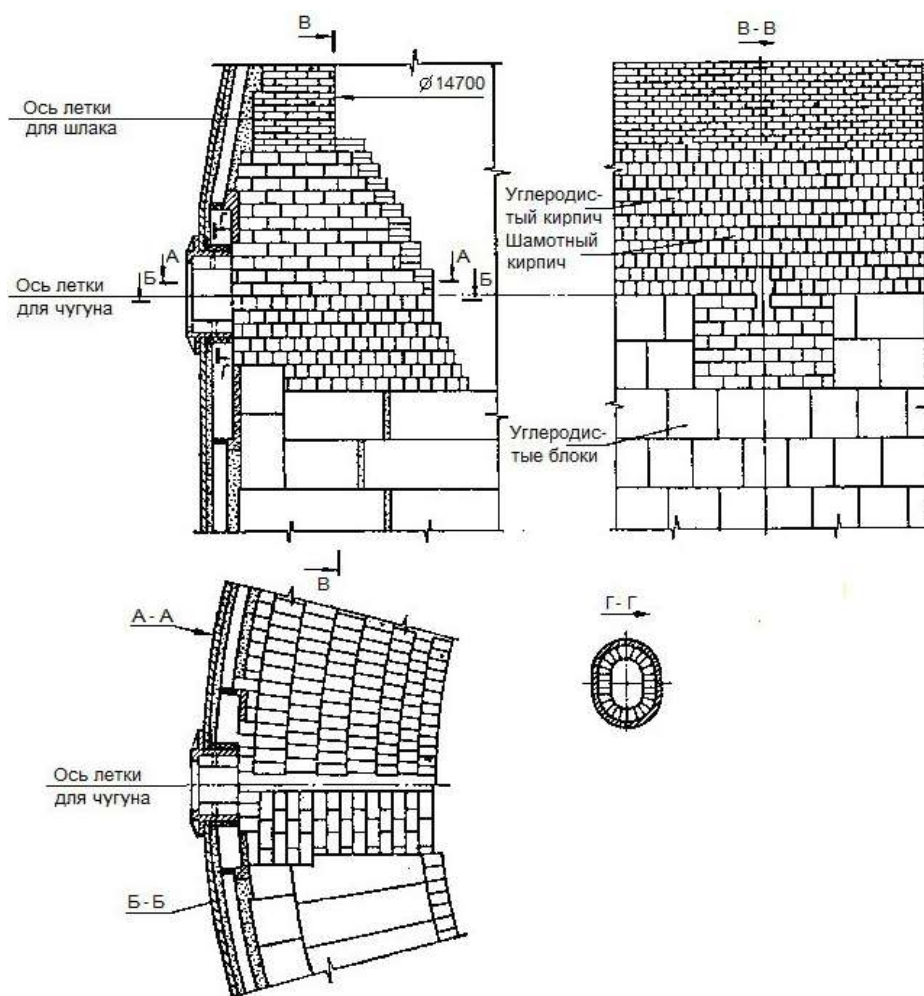


Рис. 5.4. Огнеупорная кладка горна в районе чугунных леток

Износ стен горна из больших углеродистых блоков является результатом термических напряжений и высоких механических нагрузок, приводящих к растрескиванию блоков, разрушению и усадке набивной огнеупорной массы, а также химического взаимодействия и снижения теплопроводности с течением времени. Сопутствующими износу факторами являются чрезмерная толщина стен горна, недостаточная толщина компенсационных швов, толстые разрушающиеся слои изолирующей набивной массы. Трещины, образующиеся в больших углеродистых блоках горна, усадка набивной массы у холодной поверхности огнеупора нарушают способность блоков передавать тепло системе

охлаждения, поэтому температура блоков повышается, особенно на рабочей поверхности.

При чрезмерно толстых стенах горна температура горячей поверхности углеродистого блока становится близкой к температуре жидкого металла и шлака в печи. Это приводит к ускорению химической коррозии блоков и огнеупорной массы, ускорению взаимодействия углерода с цинком и щелочами. При таких условиях давление в печи и гидростатическое давление жидкого металла нагнетают жидкие продукты плавки, газы, щелочи в поры и трещины горячего углеродистого блока.

Анализ используемого углерода показал, что чугун проникает в поры блоков размером более 1 микрона. В целях исключения проникновения жидких продуктов плавки в горячий углеродистый блок и образования в нем охрупченного слоя некоторые производители выпускают углеродистые блоки с высоким процентным содержанием очень мелких пор (микропористые, супермикропористые, ультрамикропористые и пр.). К середине 1980-х годов был разработан супермикропористый углерод с количеством пор более 1 микрона менее 2 %. Компания NDK (Nippon Denkyoku K.K) впервые в мире разработала и начала производство супермикропористых углеродных блоков (BC-8SR, BC-12SR), которые благодаря высокой стойкости к коррозии жидким чугуном позволили достичь 20-летнего срока службы и успешно применяются во всем мире. Углеродистые блоки BC-15SRT, разработанные компанией NDK, позволяют в еще большей степени сократить проникновение жидких продуктов плавки в горячий углеродистый блок благодаря адгезии (налипанию) жидкого чугуна к его поверхности и формированию на рабочей поверхности футеровки горна стабильного гарнисажа.

Опыт эксплуатации блоков BC-15SRT на доменных печах в Оите и Нагое (Япония) показывает, что износ стенок горна за 6 лет эксплуатации составляет 0 %; следы коррозии не обнаруживаются. По расчетам специалистов, кампании печей Nippon Steel Corporation должны достичь длительности свыше 30 лет.

Микропористая структура углеродистых блоков препятствует проникновению жидких продуктов плавки при их нормальном охлаждении. Но из-за растрескивания, ухудшения свойств и усадки набивной массы температура углеродистых блоков не может сохраняться на достаточно низком уровне, исключая эффект проникновения расплава. Применение набивной массы является обязательным при выполнении футеровки из больших углеродистых блоков для заполнения пространства между блоком и кожухом, между блоком и холодильниками печи. Оптимальных показателей плотности массы невозможно достичь при выполнении футеровки, и часто со временем она начинает разрушаться. Неплотно утрамбованная и не полностью спеченная масса не способна достичь требуемой теплопроводности. Слой из набивной массы становится в конечном счете барьером для нормальной теплопередачи.

Для устранения указанного недостатка компанией UKAR[®] с 1991 г. на 10 доменных печах металлургического холдинга Shougang (Китай), в том числе на ДП-1 с диаметром горна 15,5 м, реализована технология тонкостенной «намерзающей» футеровки с применением малоразмерных горячепрессованных кирпичей HotPressed[™]. Система футеровки горна ДП компании UKAR[®] основывается на поддержании ее температуры на относительно низком уровне (менее 800 °С). В соответствии с технологией UKAR[®] кладка стены горна выполняется тонкой, менее 1 м по толщине, что обеспечивает более эффективную теплопередачу и снижение температуры на рабочей поверхности футеровки (рис. 5.5).

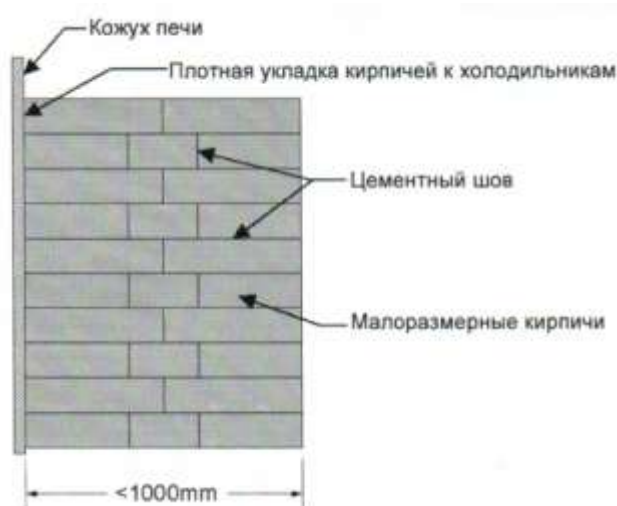


Рис. 5.5. Кладка стены горна доменной печи № 1 комбината Shougang Jintang с футеровкой UKAR[®], выполненной с применением малоразмерных горячепрессованных кирпичей HotPressed[™]

Вместо больших углеродистых блоков используются малоразмерные горячепрессованные кирпичи HotPressed™. Небольшие изделия имеют меньшее расширение, а ряды кольцевой футеровки горячей поверхности огнеупора могут расширяться независимо от кольцевой футеровки холодной поверхности, что снижает термические напряжения в кладке. Между кольцевыми рядами кирпичей и охлаждающими элементами (кожух печи или холодильники) не требуется слоя набивной массы. На всех гранях кирпичей для заполнения швов используется специальный цемент, соединяющий кирпичи вместе, обеспечивающий высокую теплопроводность и компенсирующий расширение кирпичей без создания напряжений.

Если эти принципы соблюдаются, температура внутренней поверхности футеровки горна печи будет ниже температуры застывания чугуна и шлака и на ней будет образовываться защитный гарнисаж. Гарнисаж, изолируя кирпич, еще более снижает температуру и защищает кирпич от эрозии.

В 1984 году специалистами фирмы Saint-Gobain в Savoie создана первая технология Ceramic Cup (керамическая чаша). Первые образцы керамических чаш изготавливались из плотного ультранизкоцементного огнеупорного бетона с добавлением хрома. В 1993 году была пущена первая доменная печь (фирма «Тиссен», Швельгерн) с использованием корундовых кирпичей на сиалановой связке. Поскольку вместо крупных блоков использовались небольшие кирпичи, особое значение получила конструкция чаши. Каждый блок необходимо было закрепить в соответствующем положении во избежание всплытия. Это было достигнуто созданием кирпичей с взаимозацеплением.

При использовании керамических чаш не требуется создание гарнисажа на внутренней поверхности углеродистых блоков или кирпичей. Углеродистые стены горна, защищенные керамической чашей из коранита (Coranit AL), отлично противостоят коррозии из-за воздействия металла и шлака, щелочам и цинку, окислению. Керамическая чаша имеет стабильные размеры, требуемые показатели размягчения и т. д.

В настоящее время использование супермикропористых и микропористых углеродистых изделий с использованием керамической чаши (керамического стакана) в конструкции горна находит широкое применение, в том числе на предприятиях России (доменные печи ОАО «ЕВРАЗ-НТМК», «КМЗ», «ММК», «НЛМЗ», «Северсталь», рис. 5.6).

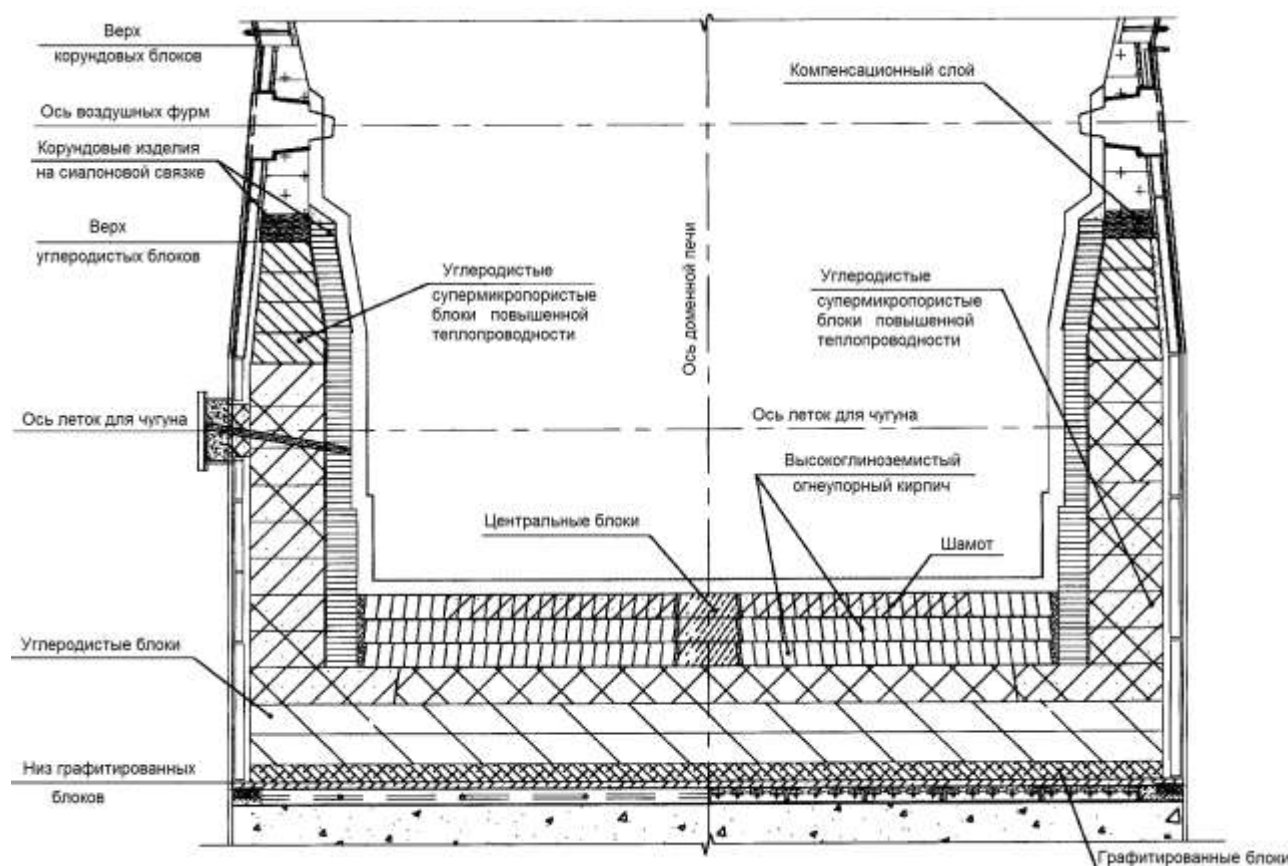


Рис. 5.6. Конструкция лещади, металлоприемника и фурменной зоны с керамическим стаканом

Углеродистая кладка горна и лещади выполняется из современных микропористых углеродистых, графитированных и полуграфитовых блоков (табл. 5.2, 5.3), защищенных внутренним керамическим «стаканом» из алюмокарборундового или корундового материала с низкой теплопроводностью и хорошей устойчивостью к жидким продуктам плавки (табл. 5.4, 5.5). Конструкция позволяет существенно уменьшить уровень тепловых потерь в горне за счет снижения тепловых потоков с 10–15 до 5–7 кВт/м². Это дает возможность снизить удельный расход кокса за счет уменьшения общих тепловых потерь.

На ДП № 6 «ЕВРАЗ-НТМК» (рис. 5.7) нижние два ряда лещади выполнены из графитированных блоков марки ДБГ-1, ряды с 3 по 5 – из углеродистых блоков марки ДБУ-1, ряды 6 и 7 – из углеродистых блоков марки ДБУ-2 повышенной теплопроводности. По периферии верхняя часть лещади, горн и низ фурменной зоны имеют 15 рядов углеродистых блоков ДБУ-2.

Таблица 5.2

Малый микропористый углеродистый блок МTKZ-1С фирмы Mayerton

Химический состав	Ед. изм.	Показатели
C _{своб}	%	≥ 65
Физические показатели:		
объемная плотность	г/см ³	≥ 1,60
пористость	%	≤ 18
прочность на сжатие	МПа	≥ 35
прочность на изгиб	МПа	≥ 16,7
средний диаметр пор	мкм	0,6
процент объема отверстий менее 1 мкм	%	≥ 63
теплопроводность	Вт/(м·К)	≥ 12
газопроницаемость	mDa	≤ 18
стойкость к щелочам		LC
Коэффициент износостойкости жидким чугуном	%	40

Таблица 5.3

Микропористый углеродистый блок GSBFCARB-78 фирмы Mayerton

Химический состав	Ед. изм.	Показатели
C _{своб} , не менее	%	78
SiC	%	5–10
Fe ₂ O ₃ , не более	%	1,0
Зола	%	15–22
Физические показатели:		
объемная плотность	г/см ³	≥ 1,58
пористость	%	≤ 16
прочность на сжатие	МПа	≥ 38
прочность на изгиб	МПа	≥ 9
средний диаметр пор	мкм	≤ 0,5
процент объема отверстий менее 1 мкм	%	≥ 75
теплопроводность	Вт/(м·К)	≥ 12
газопроницаемость	mDa	≤ 10
стойкость к щелочам		LC или U
Коэффициент износостойкости жидким чугуном	%	≤ 28

Таблица 5.4

Корундовый кирпич МНУЗГВ-78 фирмы Mayerton

(для футеровки керамического стакана, лещади и горна доменной печи)

Химический состав	Ед. изм.	Показатели
Al ₂ O ₃	%	≥ 75
SiC	%	≥ 10
Fe ₂ O ₃	%	≤ 1,2
Физические показатели:		
объемная плотность	г/см ³	≥ 2,9
прочность на сжатие	МПа	≥ 80
прочность на изгиб	МПа	≥ 18
пористость	%	≤ 18
огнеупорность	°С	≥ 1790
температура начала размягчения под нагрузкой	°С	≥ 1660
теплопроводность	Вт/(м·К)	3
изменение линейных размеров при повторном обжиге	%	0 ± 0,5
Коэффициент теплового расширения	%	0 ± 0,8
Термостойкость	раз	20

Таблица 5.5

Алюмокарборундовый кирпич GSBFCUP-80 фирмы Mayerton

(для футеровки керамического стакана, лещади и горна доменной печи)

Химический состав	Ед. изм.	Показатели
Al ₂ O ₃	%	≥ 75
SiC	%	≥ 8
Fe ₂ O ₃	%	≤ 1,0
Физические показатели:		
объемная плотность	г/см ³	≥ 3,0
прочность на сжатие	МПа	≥ 100
прочность на изгиб	МПа	≥ 18
пористость	%	≤ 16
огнеупорность	°С	≥ 1790
температура начала размягчения под нагрузкой	°С	≥ 1700
теплопроводность	Вт/(м·К)	5
изменение линейных размеров при повторном обжиге (1450 °С*, 3 ч)	%	0 ± 0,5

* Огнеупор второго поколения с пластичной фазой. Обладает уникальными свойствами самовосстанавливаться и упрочняться во время эксплуатации.

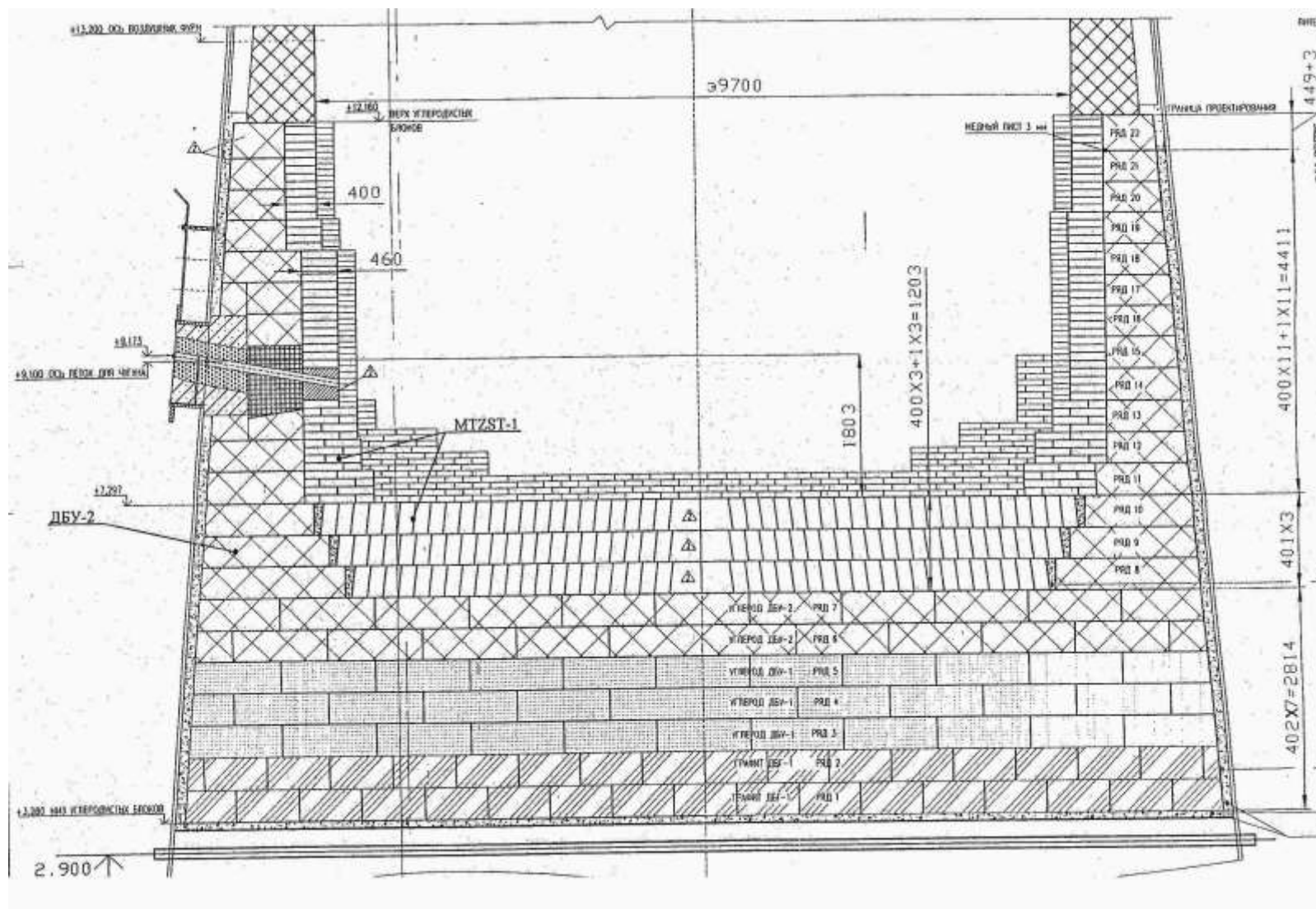


Рис. 5.7. Конструкция лещади, металлоприемника и фурменной зоны с керамическим стаканом доменной печи № 6 «ЕВРАЗ-НТМК»

Керамический «стакан» имеет следующее устройство. В верхней части лещади укладывается три ряда алюмокарборундового кирпича марки MTZST-1. Стены горна выполняются из кирпича той же марки, фурменная зона – из алюмокарборундовых блоков марки MTZST-ZH. Чугунных леток на печи – две, располагаются они диаметрально по оси литейных дворов. Футеровка в районах леток для чугуна выполняется:

- на внешней стороне (непосредственно у кожуха печи) – из микропористых шлакоустойчивых углеродистых блоков марки ДБУ-1 повышенной теплопроводности, сквозь которые проходит участок канала летки из наливного бетона;
- ближе к внутренней стороне – специальным углеродистым блоком летки; в районе керамического «стакана» – блоком из тугоплавкого керамического материала марки MTZST-ZH-1.

На доменной печи № 5 «ЕВРАЗ-НТМК» в конструкции лещади, металлоприемника и фурменной зоны с керамическим стаканом (рис. 5.8) применены микропористые и супермикропористые блоки. По периферии (на внешней стороне кладки) верхняя часть лещади (3 ряда) футерована микропористыми ММСВ блоками фирмы Mayerton. Переферийная область нижней части горна выкладывается из супермикропористых блоков марки ВС-8SR. В районе чугунных леток также применены супермикропористые блоки марки ВС-8SR фирмы NDK. Участок канала летки на внешней стороне футеровки печи выполнен из наливного бетона, а в районе керамического стакана – из тугоплавкого керамического материала. По всей высоте лещади и горна между футеровкой и кожухом печи имеется компенсационный зазор (120 мм), заполненный теплопроводной набивной массой МХТД-А.

Охлаждение горна ниже фурменной зоны и лещади на ДП № 5 и ДП № 6 «ЕВРАЗ-НТМК» производится методом наружного полива технической водой.

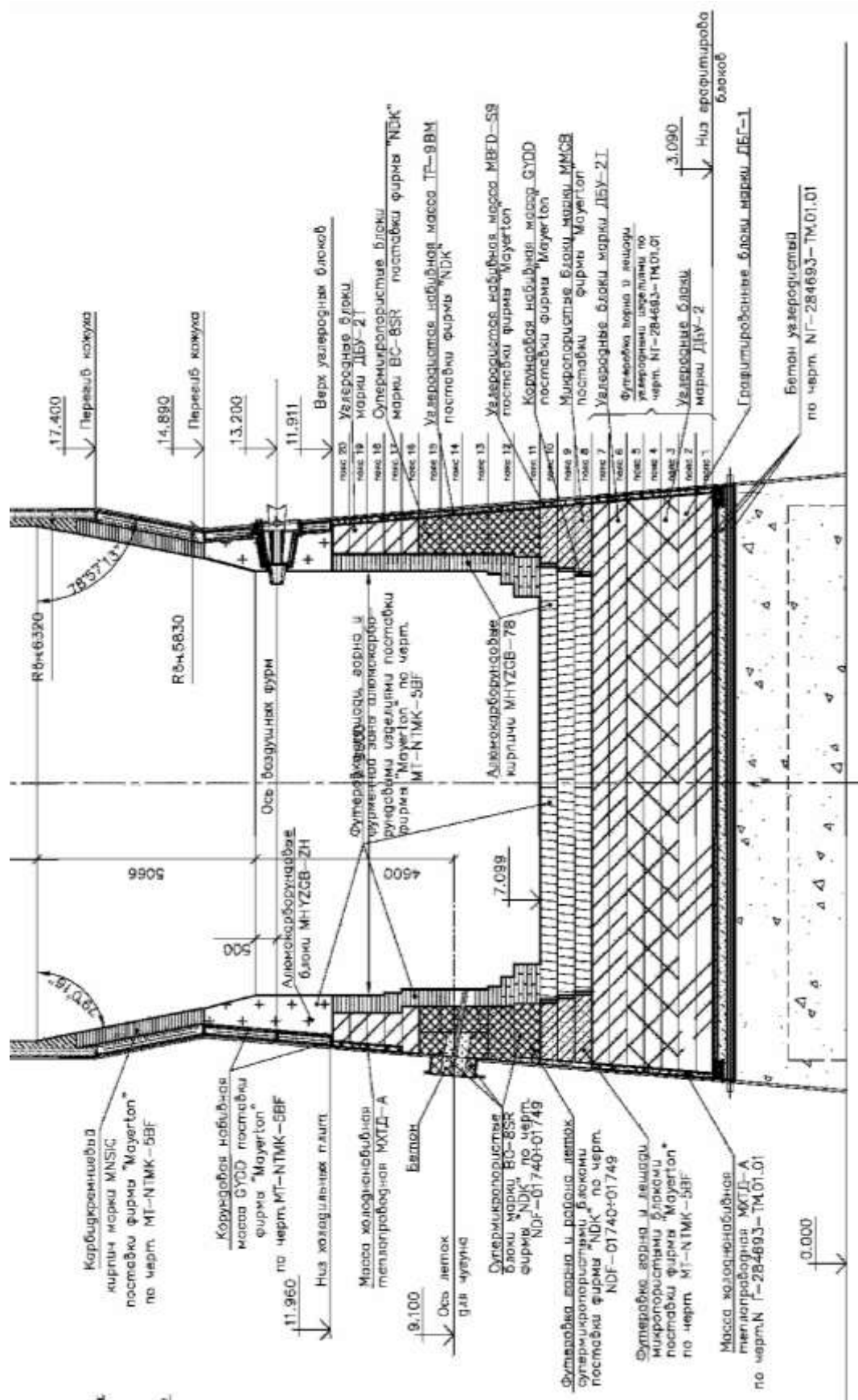


Рис. 5.8. Конструкция лещади, металлоприемника и фурменной зоны с керамическим стаканом доменной печи № 5 «ЕВРАЗ-НТМК»

Преимущества наружного полива:

- отсутствие холодильников горна, в том числе – леточных холодильников;
- снижение расхода воды;
- повышение герметичности и прочности кожуха доменной печи;
- исключение попадания воды в горн;
- постоянная температура кожуха печи, что заметно повышает надежность его работы.

Для наружного полива кожуха горна и лещади ДП № 6 необходимо 280 м^3 воды в час. Холодильники фурменной зоны, фурмы и амбразуры включены в систему водопроточного охлаждения. Отходящая вода из охлаждаемых элементов фурменной зоны в количестве $\sim 480 \text{ м}^3/\text{ч}$ поступает в сборные желоба и используется для наружного полива: из сборных желобов вода поступает в бак деаэрации, из которого затем подается в два кольцевых водовода (коллектора), а из коллекторов – в сегменты с форсунками. Вода, непрерывно выходящая из форсунок, создает тонкий слой по всей поверхности кожуха горна и лещади.

Каждый трубопровод системы наружного полива оснащен фильтром, расходомером, отключающей арматурой и патрубками с шаровыми кранами для подачи воды в отдельные сегменты с форсунками. Отработанная вода наружного полива горна и лещади собирается в сливном желобе над фундаментом доменной печи на отметке доньшка, откуда поступает в приемный резервуар насосно-фильтровальной станции. Далее из приемного резервуара вода насосами марки Д200-32 (два рабочих, два резервных) подается на самопромываемые напорные сетчатые фильтры производительностью $300 \text{ м}^3/\text{ч}$ и под остаточным напором направляется в основной сливной желоб, отводящий нагретую воду от охлаждения холодильников на внешние сооружения чистого оборотного цикла доменных печей № 5 и № 6.

В случае перевода охлаждения шахты на техническую воду применяется система с насосной станцией.

Использование новых видов огнеупоров и технологий кладки лещади и горна сопровождалось совершенствованием систем их охлаждения. В настоящее время применяется четыре варианта охлаждения:

- водяное спрейерное охлаждение (охлаждение наружным поливом);
- охлаждение с двойным кожухом или кассетное;
- охлаждение вертикальными плитовыми холодильниками из чугуна;
- охлаждение горна с помощью медных холодильников.

Водяное спрейерное охлаждение может обеспечить максимальный отвод тепла до $30\text{--}40 \text{ кВт/м}^2$. Его эффективность зависит от температуры поступающей воды, толщины слоя воды, толщины и состояния кожуха печи. По возможности теплопередачи этот способ занимает последнее место среди перечисленных вариантов.

Охлаждение с двойным кожухом (кассетное) с максимальной теплопередачей $70\text{--}80 \text{ кВт/м}^2$ занимает среднюю позицию среди различных вариантов охлаждения и по величине теплопередачи аналогично применению с помощью вертикальных чугунных холодильников горна. Показатель теплопередачи для этих вариантов зависит от давления и расхода охлаждающей воды, а также от ее температуры на входе в систему. Это означает, что оба этих варианта требуют одинаковой минимальной толщины слоя огнеупоров для безопасной работы в конце кампании печи. Из-за меньшего отвода тепла при спрейерном охлаждении необходимая минимальная толщина футеровки перед выдувкой доменной печи должна быть больше, чем при кассетном охлаждении или при охлаждении с использованием вертикальных плитовых холодильников.

Охлаждение горна с помощью медных холодильников имеет бесспорные преимущества перед другими системами охлаждения благодаря высоким показателям теплопередачи (до 300 кВт/м^2 и более). В то же время для этого способа характерны наибольшие капитальные затраты. На рис. 5.9 приведена диаграмма, иллюстрирующая величину необходимого теплоотвода от боковых стенок горна при уменьшении их толщины.

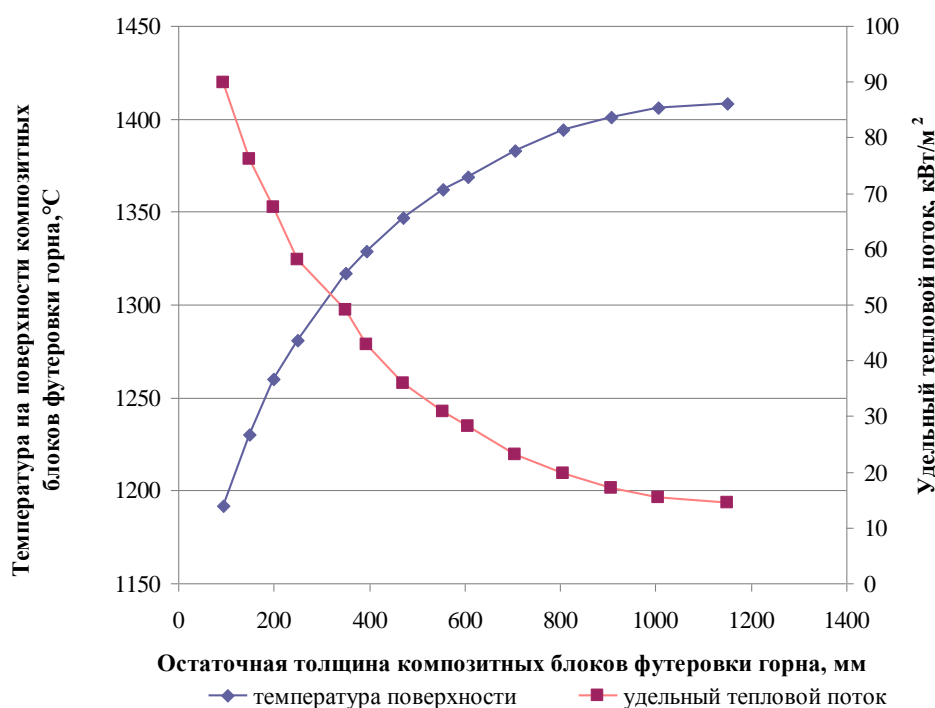


Рис. 5.9. Величина удельного теплового потока и относительной температуры на горячей поверхности футеровки горна, изготовленной из композитных блоков

Диаграмма построена для композитной кладки горна, включающей карбокерамические блоки на внутренней стороне футеровки (теплопроводность около 8 Вт/(м·К) при комнатной температуре) и блоки с более высокой теплопроводностью во внешней части футеровки (теплопроводность около 17 Вт/(м·К) при комнатной температуре). Толщина участков с обоими видами кладки примерно одинакова.

Из диаграммы следует, что спрейерное охлаждение может справиться с отводом тепла только при остаточной толщине композитных блоков более 400–700 мм. При этом температура внутренней поверхности кладки будет больше 1350 °С. При остаточной толщине блоков меньше 300–400 мм с охлаждением могут справиться только кассетная система, чугунные или медные холодильники, а при толщине блоков меньше 150 мм – только медные холодильники.

Кроме того, диаграмма показывает, что затвердевание металла произойдет только в случае, когда остаточная толщина боковой стенки достигнет примерно 100 мм перед углеродистыми блоками. Для затвердевания металла тре-

буется расчетная плотность теплового потока 90 кВт/м^2 . Такая плотность теплового потока очень велика для систем охлаждения горна со сдвоенным кожухом или чугунными холодильниками. Использование углеродистых блоков с более высокой теплопроводностью изменяет расчетную остаточную толщину футеровки, но общая скорость ее износа сохраняется. Прорыва в области горна можно избежать только при использовании медных холодильников. Однако, по финансовым соображениям, их использование для охлаждения всего горна не рекомендуется. Фирма «Пауль Вюрт» предлагает использовать медные холодильники на наиболее ответственных участках горна, например вблизи леток.

Обобщение вышеизложенного материала показывает, что существует две современные концепции повышения стойкости футеровки лещади и стен горна.

Первая концепция заключается в применении термостойкой футеровки горна (см. рис. 5.5), выполненной из различных марок углеродистых и полуграфитовых блоков с повышенной теплопроводностью.

Вторая концепция – применение керамической футеровки горна (см. рис. 5.6–5.8) и использование углеродистых блоков (в основном крупных) с низкой теплопроводностью.

С точки зрения оптимизации энергопотребления посредством уменьшения тепловых потерь через стенки керамическая футеровка горна обладает преимуществами по сравнению с термостойкой, так как позволяет значительно сократить затраты тепла на сырье и топливо.

5.2. Устройство заплечиков

При конструировании заплечиков преследуют цель либо максимального сохранения кладки, либо создания заменяющего ее прочного гарнисажа.

Известны три основные конструкции заплечиков: тонкостенные с поверхностным охлаждением поливкой водой, толстостенные с горизонтальной системой охлаждения в металлическом кожухе и тонкостенные с вертикальной системой охлаждения чугунными или медными холодильниками в металлическом кожухе. На некоторых современных печах установлены тонкостенные за-

плечи с горизонтальной системой охлаждения медными холодильниками.

Толстостенные заплечи (кладка 690–805 мм) с горизонтальной системой охлаждения применяли в типовом проекте доменной печи («Гипромет»), на печах Кузнецкого, Магнитогорского металлургических комбинатов и некоторых других предприятий (рис. 5.10, а).

Охлаждение тонкостенной кладки заплечиков при вертикальной системе охлаждения выполняют при помощи чугунных плитовых ребристых холодильников с залитым кирпичом, опоясывающих заплечи (рис. 5.10, б), или при помощи медных холодильников. Медные плитовые холодильники показывают исключительную стойкость к различным видам износа, однако основным фактором, сдерживающим их повсеместное применение на доменных печах, является их высокая стоимость и, следовательно, длительный срок окупаемости.

Толщина чугунных холодильников 275 мм. Охлаждающая вода циркулирует по залитым в тело холодильника трубам.

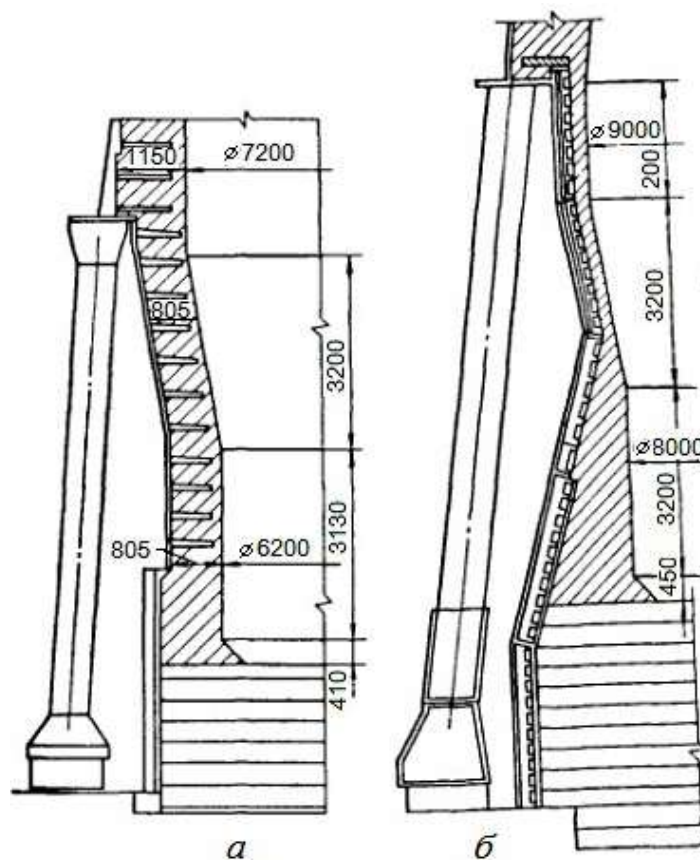


Рис. 5.10. Горн и заплечи типовых проектов I (а) и II (б)

Большая герметичность и строительная прочность заплечиков с вертикальной системой охлаждения являются ее преимуществами по сравнению с системой горизонтального охлаждения, несмотря на меньшую охлаждающую способность. Высокая герметичность и прочность имеют важное значение для печей, работающих с повышенным давлением газа в рабочем пространстве.

Кладка стен заплечиков выполняется из шамотного кирпича марок Д-1-4 (класс А, 1-й сорт) толщиной 230 или 345 мм на шамотно-глинистом растворе с тщательной подгонкой к периферийным холодильникам или из высокоогнеупорных карбидкремниевых (в т. ч. на нитридной связке) изделий на карбидкремнево-глинистом растворе (рис. 5.11).

До начала кладки стен заплечиков зазоры между периферийными плитовыми холодильниками забиваются чугушной замазкой. Зазор между кладкой и периферийными холодильниками заполняется тем же раствором, на котором ведется кладка. Кладку выполняют горизонтальными кольцами, соблюдая перевязку вертикальных швов. Толщина шва допускается не более 1 мм. Совпадение швов разрешается не более чем в пяти местах в двух смежных рядах.

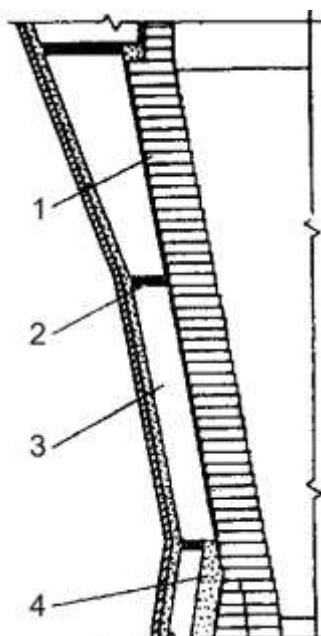


Рис. 5.11. Кладка стен заплечиков:

1 – шамотные или высокоогнеупорные карбидкремниевые изделия; 2 – чугунная замазка; 3 – периферийные плитовые холодильники; 4 – углеродистая масса

В нижней части кожуха заплечиков имеется перелом (см. рис. 5.11), отделяющий сужающуюся верхнюю часть от расширяющейся нижней. Это обеспечивает необходимую толщину кладки в районе горизонта воздушных фурм.

Кладка заплечиков подвергается интенсивному износу и быстро разгорается. На месте кладки вследствие интенсивного охлаждения на внутренней поверхности ребристых холодильников образуется значительный слой гарнисажа, который и защищает холодильники от действия высокой температуры и жидких продуктов плавки. В целях повышения устойчивости гарнисажа для охлаждения заплечиков применяют вертикальные или горизонтальные медные холодильники.

5.3. Устройство распара и шахты

Шахты доменных печей при современной интенсивности плавки являются наименее стойкой частью строения печи. Их состояние нередко обуславливает продолжительность кампании и служит причиной частых капитальных ремонтов II разряда. В связи с этим создание надежной конструкции шахты – одна из важнейших проблем проектирования, строительства и эксплуатации мощных доменных агрегатов, работа которых протекает в условиях, способствующих быстрому износу футеровки.

В зависимости от толщины футеровки шахты разделяют на три типа: толстостенные, средне- и тонкостенные.

1. Толстостенная шахта (рис. 5.12) имеет кладку толщиной 805–920 и 1265 мм в области распара. В первых типовых проектах доменных печей отечественных заводов этот тип шахты был единственным. Система охлаждения была горизонтальной со сменяемыми и несменяемыми холодильниками.

2. Среднестенная шахта имеет кладку толщиной 575 мм в охлаждаемой части (1050–1035 мм в области маратора) и 690–705 мм в неохлаждаемой части; система охлаждения вертикальная или комбинированная.

3. Тонкостенную шахту выполняют в двух вариантах: толщина кладки 230–345 мм с охлаждением по всей высоте; толщина кладки 230–345 мм в ох-

лаждаемой и 575–690 мм в неохлаждаемой частях; система охлаждения вертикальная.

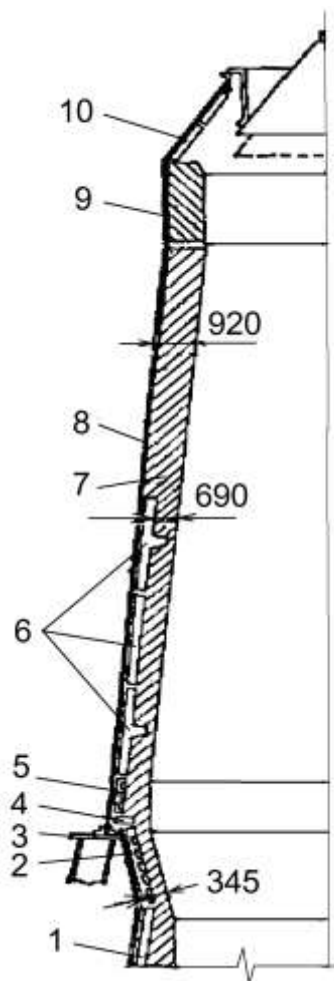


Рис. 5.12. Конструкция заплечиков и распара толстостенной шахты:

1 – холодильники горна; 2 – холодильники заплечиков; 3 – маратор; 4 – мараторные холодильники; 5 – холодильники распара; 6 – холодильники шахты; 7 – огнеупорная футеровка; 8 – кожух; 9 – футеровка колошника; 10 – купол

Толстостенная и среднестенная кладка шахты, усиленная металлическим кожухом, обеспечивает высокую строительную прочность конструкции. Тонкостенная кладка, металлический кожух, плитовые холодильники и гарнисаж обеспечивают сохранение оптимального очертания рабочего профиля печи.

Оптимальность профиля достигается в первом случае путем разгара кладки, во втором – заданными соотношениями и размерами при строительстве печи, рассчитанными на «жесткий» профиль. Разгар кладки охлаждаемой зоны полностью компенсируется образующимся при этом гарнисажем.

Тонкостенная шахта особенно рациональна при работе печей на цинксодержащих рудах, так как незначительная толщина огнеупорной кладки (230–345 мм) уменьшает ее рост вследствие резкого снижения отложений в швах и порах кирпича цинкита и сажистого углерода. Затраты на сооружение

тонкостенной шахты приблизительно на 50 % ниже, чем на сооружение толстостенной, при фактически одинаковой стойкости. Кроме того, снижаются расходы на ремонт и эксплуатацию.

По имеющимся наблюдениям, при толстостенной кладке шахты имеет место следующая динамика ее разгара: в первый год – 400 мм; в последующий год разгар увеличивается примерно на 65 мм, а затем – по 15 мм ежегодно.

Различные способы кладки шахты непосредственно отражаются на конструкции распара. Толстостенный распар опирается на тщательно выровненную и уплотненную поверхность мараторного кольца (см. рис. 5.12). Толщина кладки – 690 мм.

Для лучшей защиты мараторного узла устанавливают специальные холодильники с горизонтальными самостоятельно охлаждаемыми выступами. В отдельных случаях (комбинированная система охлаждения) применяются дополнительные горизонтальные холодильники для усиления охлаждения мараторного узла.

Оригинальная конструкция чугунных холодильников с залитым кирпичом, показанных на рис. 4.6, позволяет существенно упростить узел охлаждения маратора и тонкостенных заплечиков (рис. 5.13).

Огнеупорная кладка толстостенной шахты состоит из охлаждаемой и не охлаждаемой частей (см. рис. 5.12). Кладка толстостенного распара и охлаждаемой части шахты выполняется из шамотных или карбидкремниевых изделий. В зависимости от применяемых огнеупоров кладку распара и шахты ведут на шамотно-глинистом растворе из мертеля марки МШ-42 для шамотных изделий марок ШПД-42 и ШПД-41; на растворе из мертеля марки МШ-36 – для изделий марок ШПД-39 и ШПД-37; на карбид-кремниевоглиноземистом растворе – для карбидкремниевых изделий.

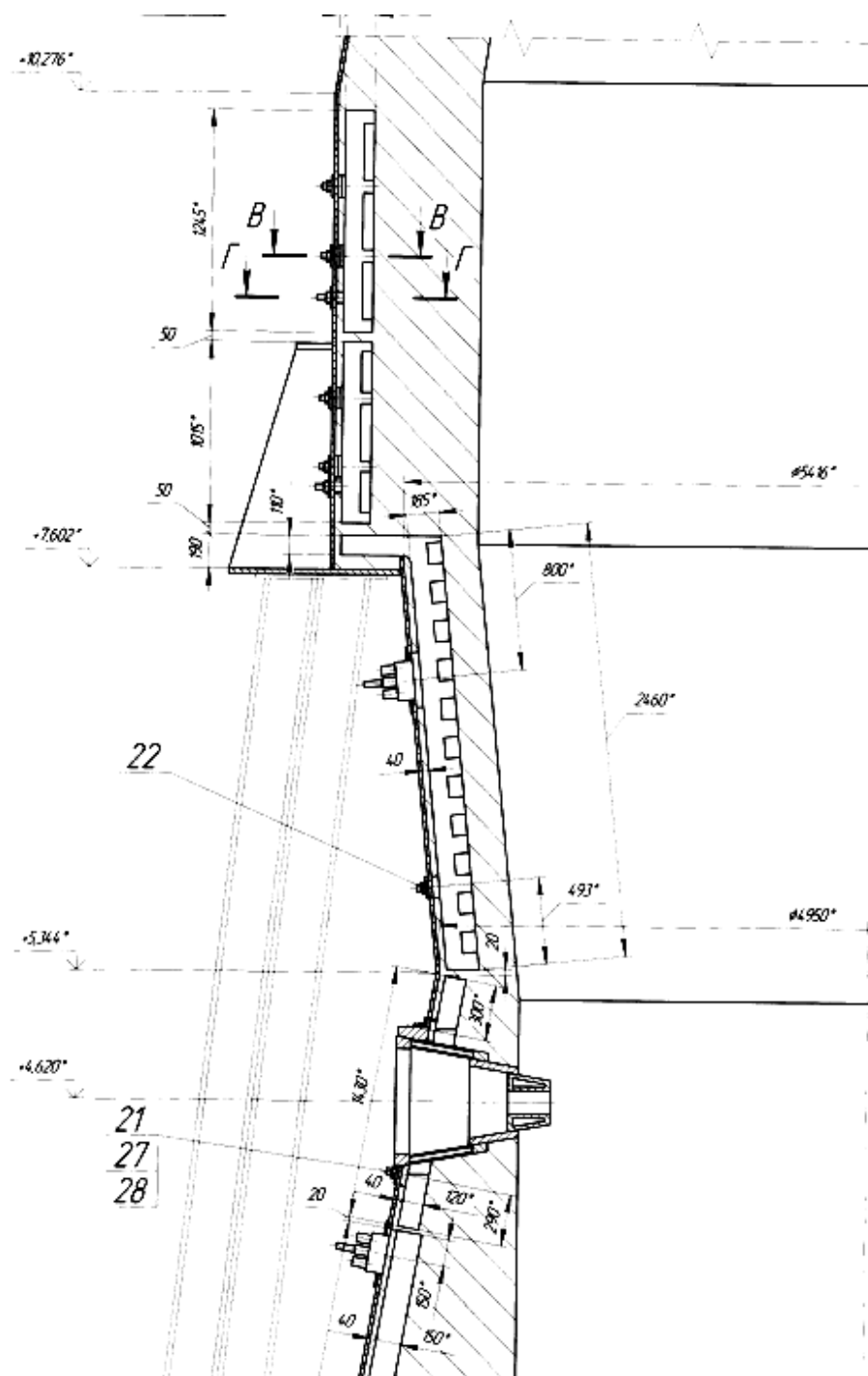


Рис. 5.13. Охлаждение маратора и заплечиков одним холодильником

Кладка распара и шахты ведется концентрическими кольцами с соблюдением перевязки радиальных и кольцевых швов с уменьшением внутреннего радиуса каждого последующего ряда кладки в соответствии с наклоном образующей профиля печи. Толщина горизонтальных и радиальных швов при кладке шахты доменных печей, работающих на шихте с содержанием цинка более 0,1 %, допускается не более 1 мм.

Эксцентриситет внутренней поверхности кладки по отношению к центру шахты (вертикальная ось, соединяющая центры маратора и опорного колошникового фланца) не должен превышать 30 мм.

Между периферийными плитовыми холодильниками и кладкой распара и охлаждаемой части шахты оставляется зазор 90–100 мм, забиваемый измельченной (0–10 мм) углеродистой массой, имеющей высокую теплопроводность, в холодном состоянии (рис. 5.14).

Для компенсации температурных напряжений в кладку устанавливают выгорающие деревянные прокладки толщиной 4 мм. Прокладки устанавливают через расчетное расстояние: через шесть огнеупорных изделий для доменных печей объемом 2000 м³ и пять – для доменных печей большего объема. При установке в шахте периферийных холодильников с горизонтальными выступами (зубьями) между кладкой и выступами оставляются зазоры, которые заполняют шамотно-глинистой массой.

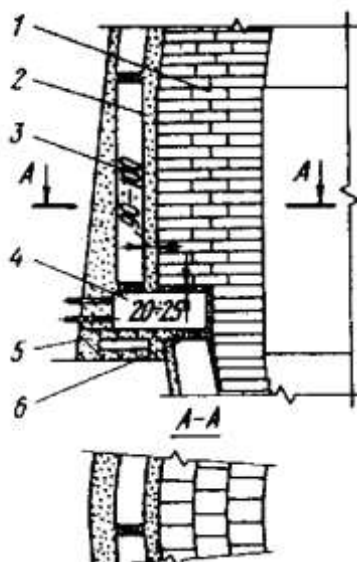


Рис. 5.14. Кладка толстостенного распара с маратором:

1 – шамотные или высокоогнеупорные карбидкремниевые изделия; 2 – углеродистая масса; 3 – периферийные плитовые холодильники; 4 – мараторные холодильники; 5 – шамотно-глинистая масса; 6 – чугунная замазка

При охлаждении шахты комбинированными холодильниками, состоящими из вертикальных периферийных и горизонтальных холодильников, между периферийными холодильниками и кладкой оставляется зазор 90–100 мм, заполняемый углеродистой массой.

При наличии в кладке горизонтальных холодильников или холодильников-кронштейнов между кожухом и кладкой распара или охлаждаемой части шахты оставляется зазор 150–200 мм, заполняемый шамотно-асбестовой или шлакоасбестовой массой.

Для охлаждения кладки нижней части шахты на некоторых печах вместо плитовых холодильников применяют крупногабаритные бетонные панели охлаждения (рис. 5.15).

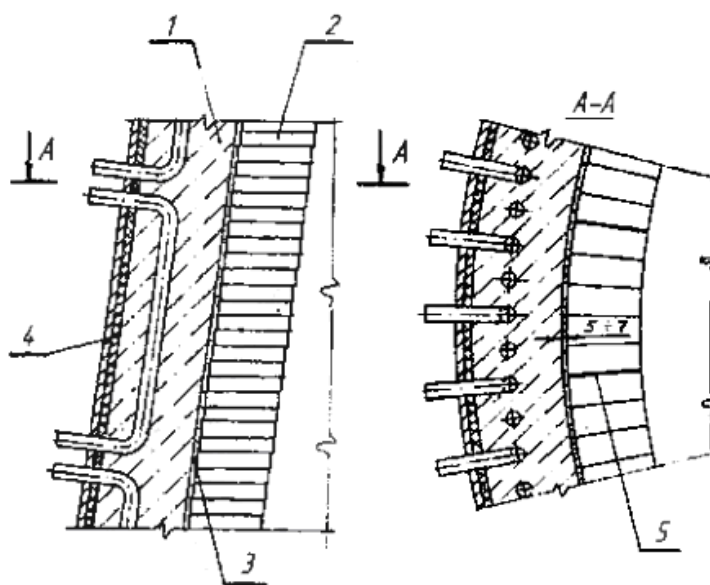


Рис. 5.15. Охлаждение кладки нижней части шахты бетонными водоохлаждаемыми панелями:

- 1 – бетонная панель охлаждения; 2 – шамотные или карбидкремниевые изделия; 3 – шамотно-глинистая масса; 4 – асбестовый картон;
- 5 – выгорающие деревянные прокладки

Кладка неохлаждаемой части шахты (рис. 5.16) выполняется из шамотных изделий на шамотно-глинисто-цементном растворе.

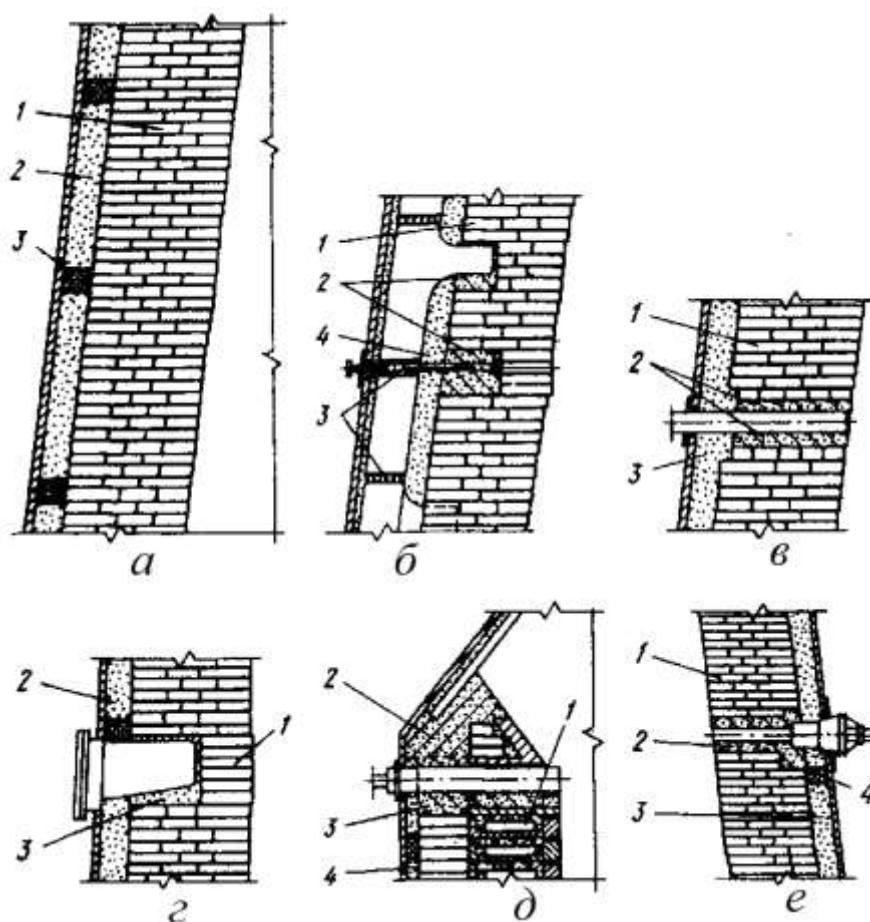


Рис. 5.16. Кладка шахты:

а – неохлаждаемая часть: 1 – шамотные изделия; 2 – шамотно-асбестовая масса или шлакоасбестовая масса; 3 – асбестосмоляные блоки; *б* – в районе глухих отверстий для термопар: 1 – шамотные или высокоогнеупорные карбидкремниевые изделия; 2 – шамотно-глинистая масса; 3 – чугунная замазка; 4 – углеродистая масса; *в* – в районе сквозных отверстий для термопар: 1 – шамотные изделия; 2 – шамотно-глинистая масса; 3 – шамотно-асбестовая или шлакоасбестовая масса; *г* – вокруг холодильников-кронштейнов: 1 – шамотные или высокоогнеупорные карбидкремниевые изделия; 2 – шамотно-асбестовая или шлакоасбестовая масса; 3 – шамотно-глинистая масса; *д* – в районе отверстия для источника излучения УРМС: 1 – шамотные изделия; 2 – глинисто-асбестовая масса; 3 – шамотно-глинистая масса; 4 – шлакоасбестовая масса; *е* – в районе установки машины для отбора проб газа: 1 – шамотные изделия; 2 – шамотно-глинистая масса; 3 – шамотно-асбестовая или шлакоасбестовая масса; 4 – асбестосмоляные блоки

Толщина горизонтальных и вертикальных швов – 2 мм, кольцевых – 2,5 мм. Кладка ведется аналогично кладке охлаждаемой зоны шахты. Между кладкой неохлаждаемой части шахты и кожухом оставляется зазор 150–200 мм, заполняемый шамотно-асбестовой или шлакоасбестовой массой, которая слегка увлажняется и утрамбовывается. Для доменных печей, работающих на цинко-содержащих рудах, зазор увеличивается до 150–300 мм и заполняется массой из асбеста хризолитового с легким увлажнением и трамбованием. Для заполнения

зазора допускается применение огнеупорных теплоизоляционных стекловолоконистых изделий.

Через каждые 1000–1500 мм в зазор на всю ширину укладываются асбестосмоляные блоки шириной 100–150 мм для компенсации тепловых расширений. Блоки изготавливаются из хризолитового асбеста и каменноугольной смолы.

Кладка шахты заканчивается на 250–300 мм (при работе на цинкосодержащих рудах – на 300–400 мм) ниже футеровочных плит колошника. Этот зазор забивается плотно утрамбованной глиноасбестовой массой.

Тонкостенный распар располагается ниже опорного основного кольца и имеет кладку, одинаковую по толщине и исполнению с заплечиками (рис. 5.17). Тонкостенную часть футеровки распара в зоне установки мараторных холодильников выкладывают толщиной 345 мм шамотными или карбидкремниевыми огнеупорами.

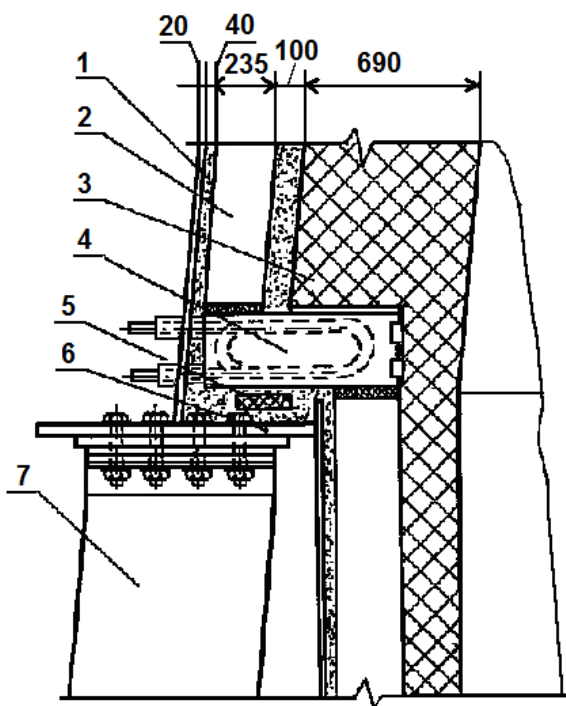


Рис. 5.17. Устройство холодильников на уровне первого пояса шахты:
1 – кожух печи; 2 – холодильник первого пояса шахты; 3 – огнеупорная кладка; 4 – мараторный холодильник; 5 – шамотный кирпич; 6 – мараторное (опорное) кольцо; 7 – опорная колонна печи

При отсутствии маратора кладка нижней части шахты имеет более плавное очертание, термические напряжения в ней снижаются. Однако при этом ухудшаются условия для опоры кладки шахты и становится невозможным воз-

ведение футеровки в двух горизонтах одновременно. В настоящее время признано необходимым сооружение (для опоры кладки) суженного маратора шириной 400 мм, что осуществлено на доменной печи 5580 м³ ОАО «Северсталь».

Защита огнеупорной кладки и кожуха шахты доменной печи при помощи литых чугунных холодильников с водяным или испарительным охлаждением, как показали исследования, имеет ряд недостатков, связанных с образованием трещин в чугуне и выходом из строя охладительного контура вследствие науглероживания труб.

Для повышения срока службы шахты на доменных печах Донецкого металлургического завода и Мариупольского металлургического комбината им. Ильича успешно реализованы системы охлаждения шахты крупногабаритными охлаждаемыми модулями [11].

Крупногабаритные охлаждаемые модули (рис. 5.18) общей длиной, равной высоте охлаждаемой зоны, представляющие собой трубы охлаждения и монтажные приспособления, монтируются на кожухе шахты с внутренней стороны. Вся охлаждаемая зона шахты состоит из нескольких (6–9) модулей, количество и ширина которых определяются внутренним диаметром колошникового опорного кольца, через которое модули вводятся в печь при монтаже, а также грузоподъемностью монтажного крана. С внутренней стороны модули бетонируются жаропрочным бетоном для заполнения межтрубного пространства и создания теплозащитного слоя в начальном периоде работы доменной печи.

В процессе эксплуатации защитный слой бетона изнашивается. Трубы и промежутки между ними покрываются слоем гарнисажа (рис. 5.19), толщина которого зависит от расстояния между трубами охлаждения и многих других факторов. В верхней части охлаждаемой части шахты толщина гарнисажа составляет 200–300 мм, в нижней – до 500 мм и более. Гарнисаж имеет слоистую структуру и включает кокс, шлак, железистый расплав с корольками металла, известняк, спеки материалов, входящих в состав шихты. В нижней части модулей гарнисаж представляет собой плотную, оплавленную массу; в верхней – рыхлую массу, хорошо отделяющуюся от труб и бетона модулей. Характерной

особенностью структуры гарнисажного покрытия является наличие графитного или углеродистого слоя непосредственно на поверхности труб охлаждения. Выделение углерода на этих участках можно объяснить интенсивным протеканием реакции $2\text{CO} = \text{CO}_2 + \text{C}$ в результате резкого снижения температуры вблизи стенок труб охлаждения.

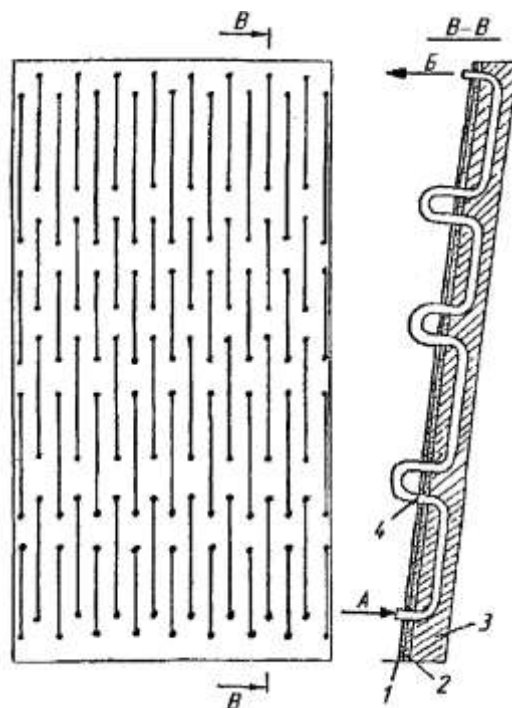
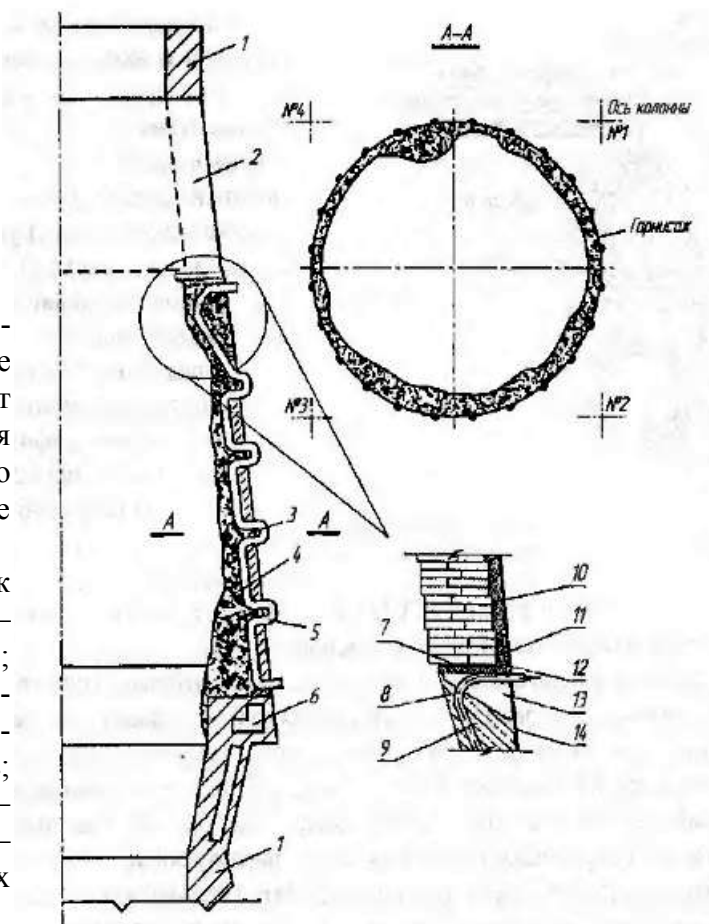


Рис. 5.18. Общий вид крупногабаритного охлаждаемого модуля шахты доменной печи:
1 – кожух; 2 – слой асбеста; 3 – жаропрочный бетон;
4 – стальная толстостенная труба; А и Б – подвод и отвод хладагента соответственно

Стойкость гарнисажного покрытия и, следовательно, труб охлаждения модулей шахты во многом определяется технологией доменной плавки. На доменной печи № 11 Днепропетровского металлургического комбината шахта, выполненная из крупногабаритных модулей, проработала без капитального ремонта более 12 лет.

Рис. 5.19. Схема гарнисажного покрытия в охлаждаемой части доменной печи объемом 2002 м³ после выдувки на капитальный ремонт II разряда и схема узла примыкания верхней части крупногабаритного охлаждаемого модуля к футеровке неохлаждаемой части шахты [11]:

1 – огнеупорная кладка; 2 – участок обрушенной футеровки; 3 – бетон; 4 – гарнисаж; 5 – охлаждающий контур; 6 – мараторный холодильник; 7 – шамотно-глинистая масса; 8 – скоба охлаждения; 9 – охлаждаемый модуль; 10 – шамотно-асбестовая масса; 11 – шамотно-глинистый раствор; 12 – кронштейн; 13 – косынка; 14 – кожух шахты печи



Поиск оптимальных технических решений устройства кладки доменных печей привел к появлению качественно новых конструкций. Современные тонкостенные доменные печи оснащены холодильниками шахты по всей высоте (см. рис. 4.12–4.13) и не имеют кирпичной кладки распара и шахты (рис. 5.20–5.21). Футеровка заплечиков выполняется из шамотного кирпича марки ШПД-43 или карбидкремниевого кирпича.

Использование медных холодильников в распаре и нижней части шахты и чугунных плитовых холодильников с залитым кирпичом в верхней части шахты при испарительном охлаждении печи позволило осуществить футеровку стен распара и шахты торкрет (шоркрет)-бетоном (рис. 5.20–5.21). Толщина бетонной футеровки составляет 120–150 мм.

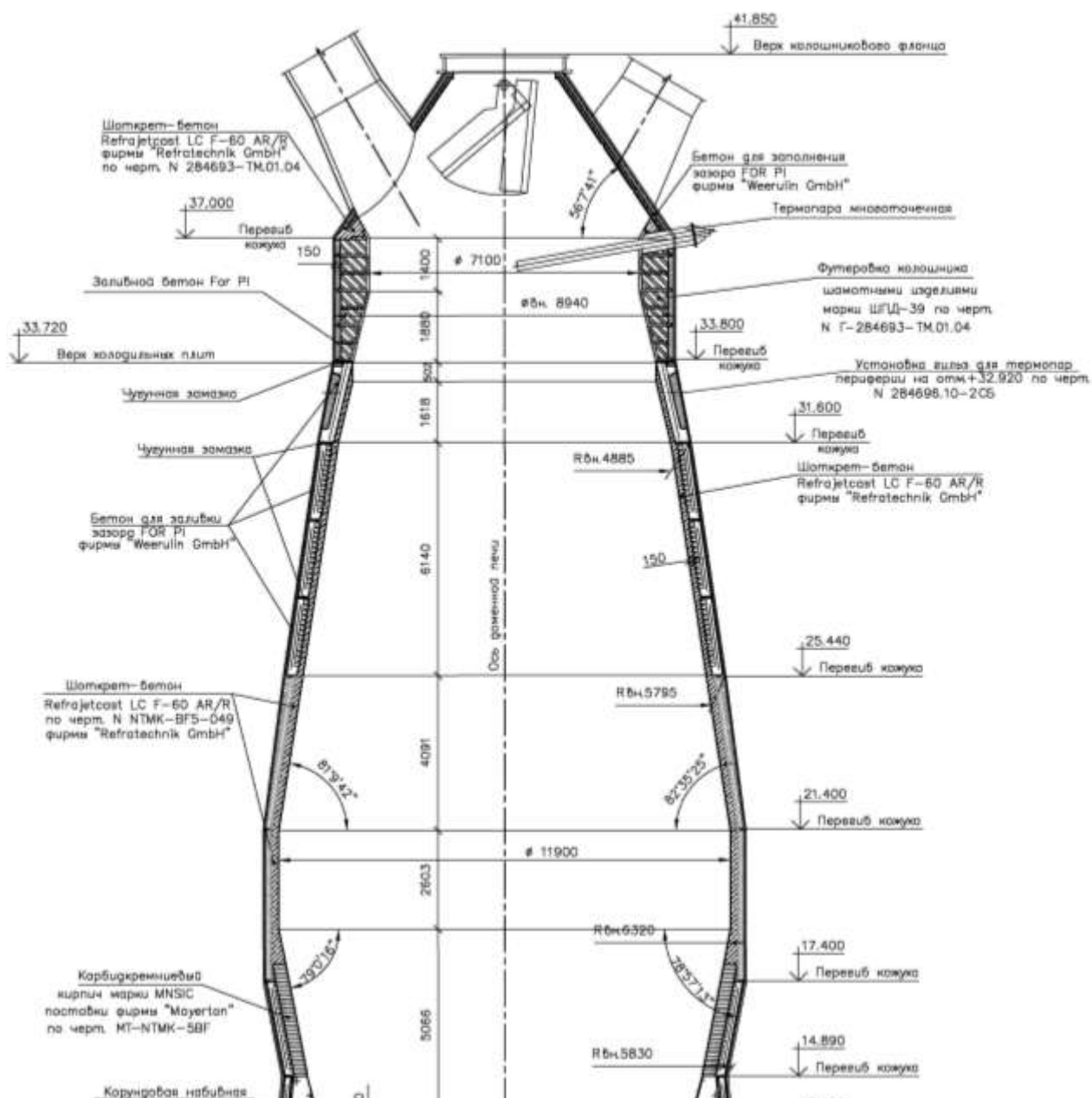


Рис. 5.21. Футеровка заплечиков, распара, шахты и колошника
ДП № 5 ОАО «ЕВРАЗ-НТМК»

5.4. Устройство и футеровка колошника печи

Колошниковая часть печи выполняется из стальных литых плит, выдерживающих ударную нагрузку, возникающую при падении шихтовых материалов с засыпного аппарата. Бронева защита колошника устанавливается для сохранности огнеупорной кладки, а значит, и для сохранности размеров цилинд-

рической части колошника. Только в этом случае возможно направленное распределение материалов в печи и управление газовым потоком.

На рис. 5.22 показано устройство защитных плит колошника подвесной конструкции. Неохлаждаемые плиты крепятся между собой болтами, а к кожуху печи – с помощью кронштейнов, серег и штырей. Огнеупорная кладка шахты заканчивается на 50–120 мм ниже защитных плит колошника; зазор между кладкой и плитами забивается плотно утрамбованной глинисто-асбестовой массой.

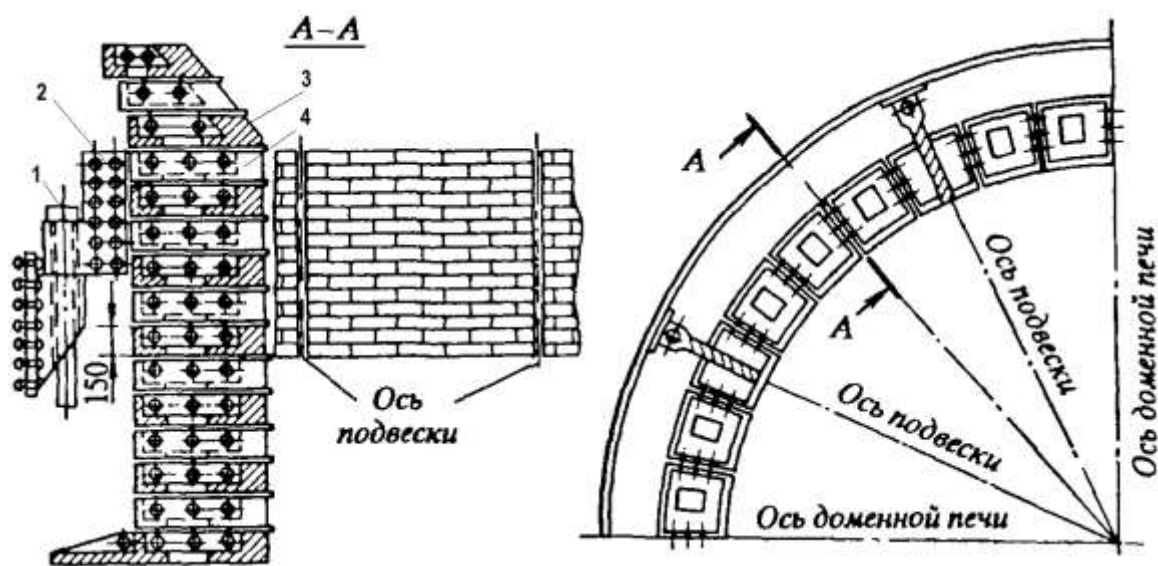


Рис. 5.22. Конструкция колошника доменной печи:
1 – штырь; 2 – серга; 3 – неохлаждаемая плита; 4 – кронштейн

В районе защитных плит огнеупорная кладка выполняется из шамотных изделий на шамотно-глинисто-цементном растворе. Зазор между кожухом и кладкой заполняется так же, как и в шахте. Полости защитных плит заполняются жароупорным бетоном или шамотным кирпичом.

Между кладкой колошника и кожухом печи оставляется зазор 100–150 мм, который заполняется шлакоасбестовой массой. Полость между верхней конической частью футеровочных плит колошника и футеровочными плитами купола печи заполняется плотно утрамбованной глинисто-асбестовой массой.

Бронева защита колошника может иметь различные конструкции. Защитные плиты колошника могут крепиться болтами к листовым подвескам,

прикрепленным к куполу печи (рис. 5.23). В этом случае плиты крепятся между собой также болтами.

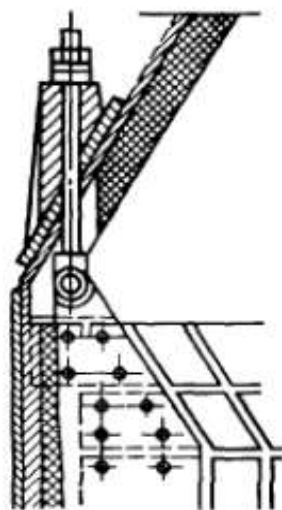


Рис. 5.23. Подвеска крепления плит к куполу печи

На доменной печи с полезным объемом 5580 м^3 стальные защитные плиты образуют сплошную металлическую стенку, внутренняя полость которой заполнена огнеупорным кирпичом. В США применяют футеровку колошника карборундовым кирпичом без стальных плит. Значительное распространение получила конструкция колошника с регулируемым диаметром. Это особенно актуально для доменных печей большого объема, снабженных двухконусным засыпным устройством. Ряд конструкций подвижной броневой защиты колошника показан на рис. 5.24.

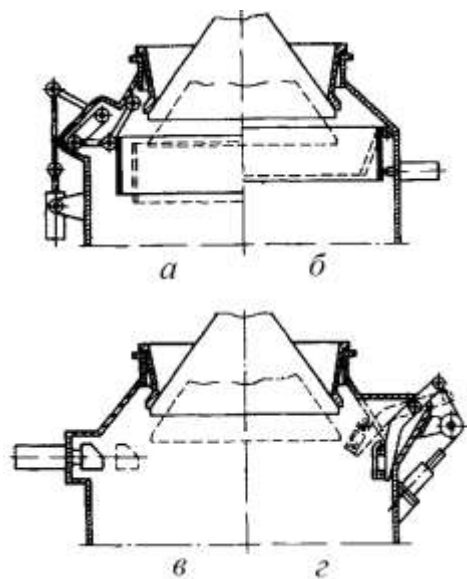


Рис. 5.24. Подвижные плиты колошника:
а – многорычаговая система с пневматическим двигателем; *б* – передвижные плиты или несколько плит с электродвигателем; *в* – передвижение скошенной плиты с электродвигателем; *г* – передвижение плиты через блоки пневматическим двигателем

5.5. Конструкция купольной части доменной печи

На рис. 5.25 показаны некоторые варианты футеровки купола печи. Футеровка может производиться:

- жаростойким торкрет-бетоном и стальными футеровочными плитами;
- жаростойким торкрет-бетоном, огнеупорными теплоизоляционными стекловолоконистыми изделиями и стальными футеровочными плитами;
- стальными футеровочными плитами.

На доменных печах объемом до 2000 м³ при ремонтах допускается футеровка кожуха купола жаростойким бетоном.

Зазоры между футеровочными плитами забиваются чугуной замазкой. При футеровке купола печи только стальными футеровочными плитами зазор между плитами и кожухом размером обычно 20–30 мм заполняется под давлением шамотно-глинисто-цементным или шамотно-цементным раствором.

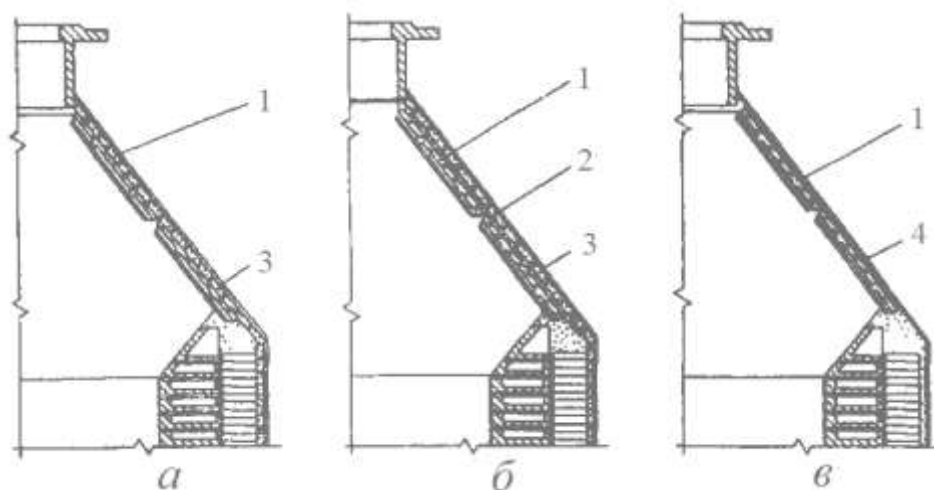


Рис. 5.25. Футеровка купола печи:

а – футеровка жаростойким торкрет-бетоном и футеровочными плитами; *б* – футеровка жаростойким торкрет-бетоном, огнеупорными теплоизоляционными стекловолоконистыми изделиями и футеровочными плитами; *в* – футеровка стальными футеровочными плитами; 1 – стальные футеровочные плиты; 2 – огнеупорные теплоизоляционные стекловолоконистые изделия; 3 – жаростойкий торкрет-бетон; 4 – шамотно-глинисто-цементный раствор

6. ОБОРУДОВАНИЕ ГОРНА ПЕЧИ

6.1. Чугунные и шлаковые летки

Чугунная летка – это отверстие в огнеупорной кладке горна печи, служащее для выпуска чугуна и нижнего шлака. На доменных печах, имеющих объем свыше 1000 м^3 , делается две, три или даже четыре чугунных летки. Все летки на печи располагаются на одном уровне. Расстояние между летками по окружности горна печи составляет $80\text{--}90^\circ$.

Чугунная летка (рис. 6.1) делается в стенке горна над зумпфом на стыке двух вертикальных плитовых холодильников в виде прямоугольного канала шириной 250–300 мм и высотой 450–500 мм. При углеродистой футеровке выполняется отверстие диаметром 50–60 мм.

Вырез в кожухе печи в районе летки усиливается стальной литой рамой, которая приваривается к кожуху. Внутренняя поверхность рамы, закрывающая тело леточных холодильников, футеруется двумя рядами (вглубь) и одним рядом по ширине кирпичом, так называемым венчиком.

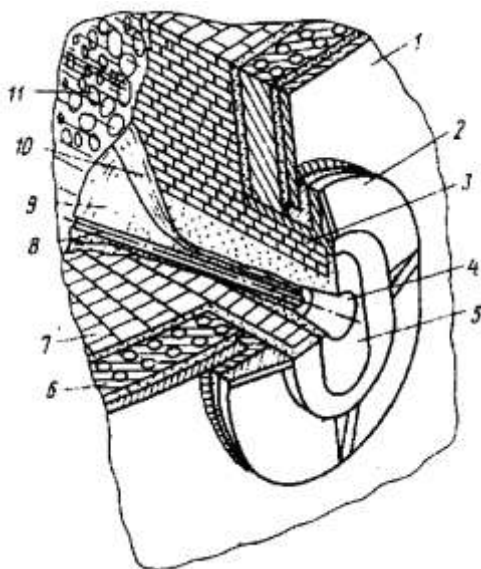


Рис. 6.1. Чугунная летка:

1 – кожух печи; 2 – рама летки; 3 – венчик; 4 – футляр; 5 – футлярная набивка; 6 – холодильник чугунной летки (двухрядный); 7 – кладка печи; 8 – леточный канал; 9 – леточная масса; 10 – старая леточная масса; 11 – продукты плавки

Состояние венчика контролируется после каждого выпуска, обнаруженные повреждения должны немедленно устраняться. Второй ряд венчика, который изнашивается в меньшей степени, чем первый, ремонтируется по мере необходимости обычно в период длительных остановок печи. Первый внешний ряд можно ремонтировать на ходу печи, но обязательно при хорошем состоянии летки. Для предохранения венчика от износа его следует менять не менее одного раза в 10 дней безотносительно к его состоянию. Если на венчике обнаружены дефекты, то его нужно ремонтировать ранее установленного срока. После ремонта венчик сушат в течение 10–15 минут, после чего нужно приступать к набивке футляра.

Футляром называется огнеупорная набивка, предохраняющая металлическую раму чугунной летки от соприкосновения с расплавами чугуна и шлака. В футляре делается отверстие, в которое входит носок пушки при закрытии летки. Футляр – одна из ответственных частей чугунной летки, и уходу за футляром чугунной летки следует уделять особое внимание. Срок службы футляра определяется многими обстоятельствами: качество футлярной массы, качество изготовления футляра, свойства шлака (основность, вязкость, химический состав), масса выпускаемых расплавов, интенсивность и длительность продувки летки при окончании выпуска чугуна.

Футляр летки набивается в срок, установленный графиком. При ухудшении состояния футляра его ремонт осуществляется независимо от графика. Ремонт футляра состоит из его разборки, набивки и сушки. Перед разборкой футляра должна быть полная уверенность в том, что длина летки нормальная и летка надежно закрыта. Перед ремонтом футляра выпуск чугуна должен быть выдан по графику, печь полностью освобождена от продуктов плавки, летка хорошо продута и забита достаточным количеством леточной массы.

Шлаковая летка служит для выпуска из печи так называемого «верхнего» шлака. Делается на высоте примерно $\frac{2}{3}$ высоты горна. Ранее на печах объемом свыше 600 м³ устанавливалось две шлаковых летки. С увеличением числа чугунных леток и числа выпусков до 18–24 в сутки шлаковая летка теряет свое

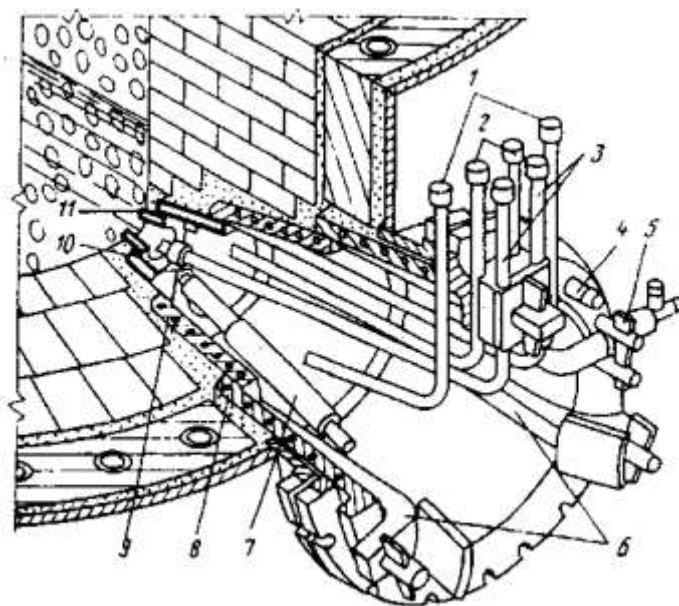
значение, и на печах большого объема в ряде случаев устанавливается одна шлаковая летка, имеющая резервное значение. На некоторых печах, например на доменной печи № 2 «ЧусМЗ», выплавляющей ванадиевый чугун, выпуск верхнего шлака вообще не производится и необходимости в ее установке нет.

Устройство шлаковой летки принципиально отличается от конструкции чугунной летки в связи с тем, что оно должно исключить возможность контакта шлака с огнеупорной кладкой печи для предотвращения их химического взаимодействия. Поэтому шлаковая летка оборудуется специальным устройством – шлаковым прибором (рис. 6.2).

Составными частями шлакового прибора являются медная шлаковая фурмочка 11, литой медный охлаждаемый холодильник (шлаковая амбразура 10), чугунный холодильник и шлаковая «кадушка» 9 с залитыми охлаждаемыми спиральными трубками. В зависимости от диаметра горна диаметр выпускного отверстия шлаковой фурмочки делается равным 50–65 мм.

Рис. 6.2. Шлаковая летка:

1 – трубы охлаждения шлаковой кадушки;
2 – трубы охлаждения шлаковой амбразуры;
3 – подвод и отвод воды охлаждения шлаковой фурмы;
4 – трубы охлаждения рамы;
5 – клиновое крепление; 6 – упоры шлаковой кадушки;
7 – упор шлаковой амбразуры; 8 – рама; 9 – шлаковая кадушка;
10 – шлаковая амбразура; 11 – шлаковая фурма



Крепление шлакового прибора осуществляется за счет фиксации труб водяного охлаждения к кожуху печи или к раме прибора при помощи клиновых болтов. Крепление труб фурмочки, холодильников и амбразуры осуществляется системой скоб, закрепляемых при помощи клиньев. При высоком давлении

газа под колошником устанавливаются дополнительные упоры, закрепляемые болтами.

6.2. Фурменное устройство

Дутье к фурмам подводится по кольцевому воздухопроводу, который подвешивается на тягах к маратору или к кожуху заплечиков. Действительная скорость движения нагретого дутья в нем должна быть в пределах 40–50 м/с.

Найдем диаметр воздухопровода горячего дутья для печи № 2 «ЧусМЗ» объемом 1033 м³ при расходе дутья (при «нормальных» условиях) 1550 м³/мин, температуре дутья 975 °С и давлении 2,03 ати.

Приведенный расход дутья

$$V_{\text{д}}^{\text{п}} = \frac{1550 \cdot (975 + 273)}{273} \cdot \frac{1}{(1 + 2,03)} = 2338 \text{ м}^3/\text{мин}, \text{ или } 39 \text{ м}^3/\text{с}.$$

При заданной скорости движения дутья в кольцевом воздухопроводе 50 м/с площадь поперечного сечения воздухопровода составит

$$S = \frac{39}{50} = 0,78 \text{ м}^2.$$

Тогда внутренний диаметр кольцевого воздухопровода будет

$$d_{\text{в}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,78}{\pi}} = 0,996 = 1,0 \text{ м}.$$

В этом случае при футеровке кольцевого воздухопровода огнеупором толщиной 115 мм в два оката, толщине теплоизолятора (асбест) 50 мм и толщине стального кожуха 10 мм наружный диаметр составит

$$d_{\text{н}} = 1000 + 2 \cdot 115 \cdot 2 + 50 \cdot 2 + 2 \cdot 10 = 1580 \text{ мм}.$$

В кольцевой воздухопровод горячего дутья осуществляется врезка воздушных патрубков, соединяющихся с фурменными устройствами – фурменными приборами.

Фурменное устройство (рис. 6.3) состоит из полый медной литой или штампованной из листовой меди воздушной фурмы 10 с толщиной стенки до 8 мм и 5–6 мм в торцевой части, полого медного (иногда бронзового) литого фурменного холодильника, называемого часто амбразурой 12, и чугунного

холодильника 11 – кадушки. Фурменный холодильник крепится к кожуху печи через фланец болтами.

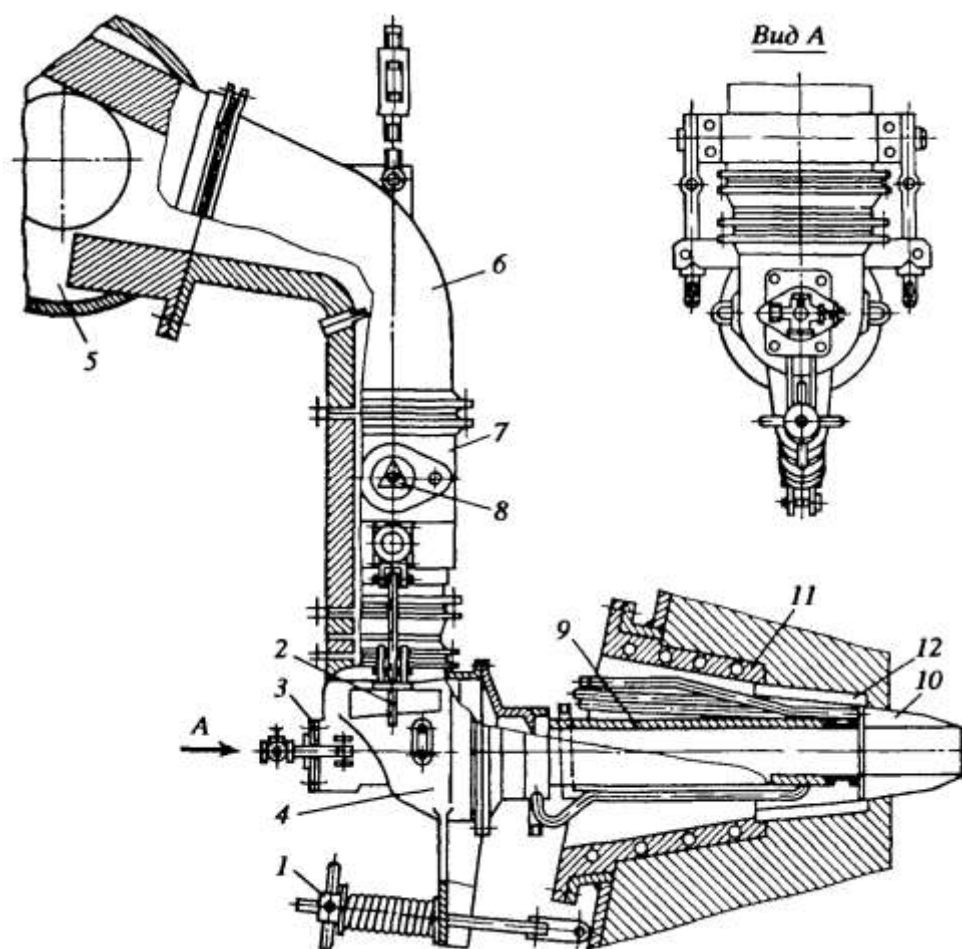


Рис. 6.3. Фурменное устройство доменной печи:

1 – натяжной болт; 2 – серьга с клином; 3 – фланец фурменного колена; 4 – подвешенное (подвижное) колено; 5 – кольцевой воздухопровод (5 – отверстие для измерения расхода дутья); 6 – фурменный рукав; 7 – неподвижное колено; 8 – дроссельное устройство; 9 – сопло; 10 – фурма; 11 – фурменный холодильник; 12 – амбразура

Все детали последовательно вставляются одна в другую в имеющиеся внутри них конические заточки, обеспечивающие герметичность соединения, и устанавливаются строго на свои места: кадушка – в кладку печи, воздушная амбразура – заподлицо с кладкой и воздушная фурма – в рабочее пространство печи с высовом на 250–350 мм.

Охлаждение деталей фурменного прибора осуществляется водой, подводимой к торцевым частям фурмы и амбразуры, а также спиральной трубе кадушки.

К фурменному устройству относятся также сопло, по которому дутье от подвижного фурменного колена подается в фурму, подвижное колено 4 с патрубком и гляделкой для наблюдения за работой фурмы, неподвижное колено 7 и фурменный рукав 6. Сочленения (фурма – сопло – подвижное колено – неподвижное колено) осуществляются через шаровые заточки для обеспечения их герметичности даже при имеющих место взаимных смещениях отдельных деталей.

Подвижное колено подвешивается к неподвижному при помощи двух шарнирных подвесок (серег) с клиньями 2. Натяжным болтом 1 осуществляется подтяжка фурменного колена к соплу и сопла к фурме.

Фурменное колено, фурменный рукав и патрубок выполняются литыми из стали и внутри футеруются шамотным кирпичом ($1/4$ толщины нормального огнеупора). Сопла футеруются специальными кольцами или делаются набивными из огнеупорной массы. Незафутерованные торцевые части сопел и колен делаются водоохлаждаемыми.

При высокой температуре дутья вследствие возникающих термических напряжений в местах сочленения шаровых подвижных элементов фурменного прибора иногда возникают продувы, влекущие перегрев шаровых соединений. Для их ликвидации печь вынужденно останавливают, так как их прогар может привести к аварийной ситуации.

В целях исключения продувов высоконагретого и обогащенного кислородом дутья ($t_d = 1150\text{--}1250\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $28\text{--}32\text{ \% O}_2$), а также ускорения операций при смене деталей фурменного устройства разработана конструкция компенсатора сильфонного типа без шаровых соединений посредством совмещения в одной конструкции сопла, подвижного колена и шарового патрубка. Общая масса такой конструкции $1,5\text{--}2,5\text{ т}$.

Так, доменная печь № 6 ОАО «ЕВРАЗ-НТМК» оснащена 22 фурменными приборами (рис. 6.4) с сильфонными компенсаторами, позволяющими исключить осевые и боковые движения отдельных частей самого фурменного прибора и кольцевого воздухопровода из-за тепловых деформаций кожуха печи.

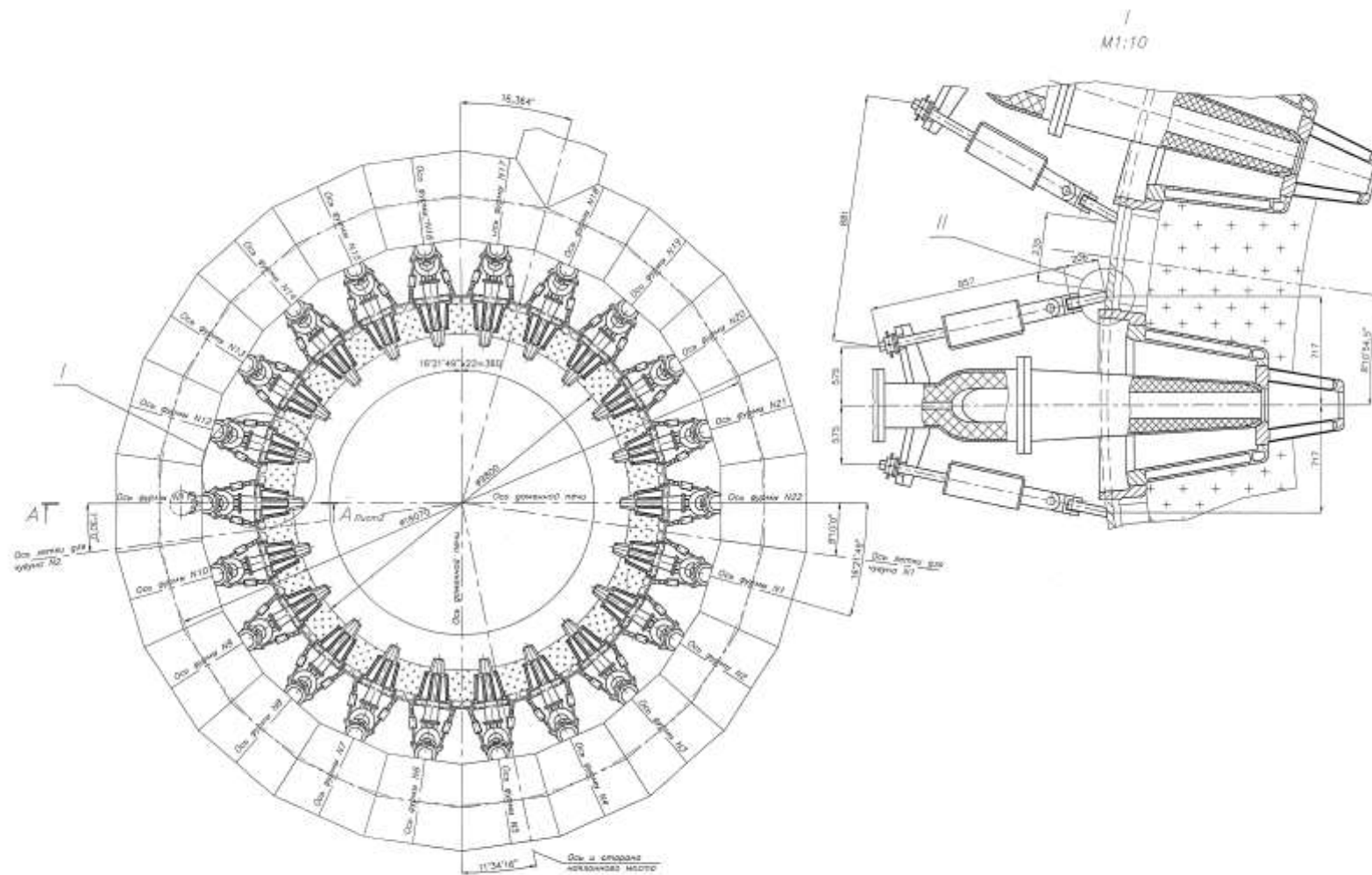


Рис. 6.4. Установка воздушных форм по периметру горна ДП № 6 ОАО «ЕВРАЗ-НТМК»

Для опирания воздухопровода горячего дутья между колоннами опорной системы печи предусматривается балочная клетка под четыре катковые опоры. Данное решение в комплексе с установкой компенсаторов на фурменных приборах и прямом участке воздухопровода горячего дутья позволяет получить несмещаемый центр воздухопровода относительно оси печи и иметь одинаковую длину всех фурменных рукавов.

Фурменный прибор (рис. 6.5) выполнен как трехшарнирный пространственный механизм. Первый шарнир (сферический) находится в месте соединения фурмы и сопла, второй и третий находятся в наклонной воздухопроводной части и оба закрыты сильфонными компенсаторами.

Канал для подачи горячего дутья футеруется жаростойким бетоном, а в области второго и третьего шарнира – керамическими вогнутыми и выпуклыми блоками, стойкими к высоким температурам. Огнеупорная футеровка дополнена теплоизоляцией из волокнистых минеральных материалов, имеющих цель максимально снизить тепловые потери и опасность прогрева наружного стального кожуха фурменного прибора.

Смонтированный прибор решен как самонесущая конструкция. Это значит, что он не имеет других подвесок, кроме одной вспомогательной подвески, используемой при монтаже или демонтаже.

Такая конструкция существенно упрощает замену воздушных фурм, уменьшая затраты ручного труда и сокращая время простоя доменной печи. Сопло при смене фурмы в этом случае снимается вместе с нижней частью фурменного рукава с помощью специального приспособления. Но при этом конструкция рабочей площадки вокруг доменной печи должна обеспечивать подъезд к фурменным приборам средств механизации, например электромотокаров.

Оси чугунной и шлаковой леток не должны проходить под воздушными фурмами. Это, во-первых, затрудняет обслуживание как леток, так и фурм, а во-вторых, известно, что когда летки располагаются под фурмой, то кладка в этой зоне быстро изнашивается. Лучше летки располагать между воздушными фурмами.

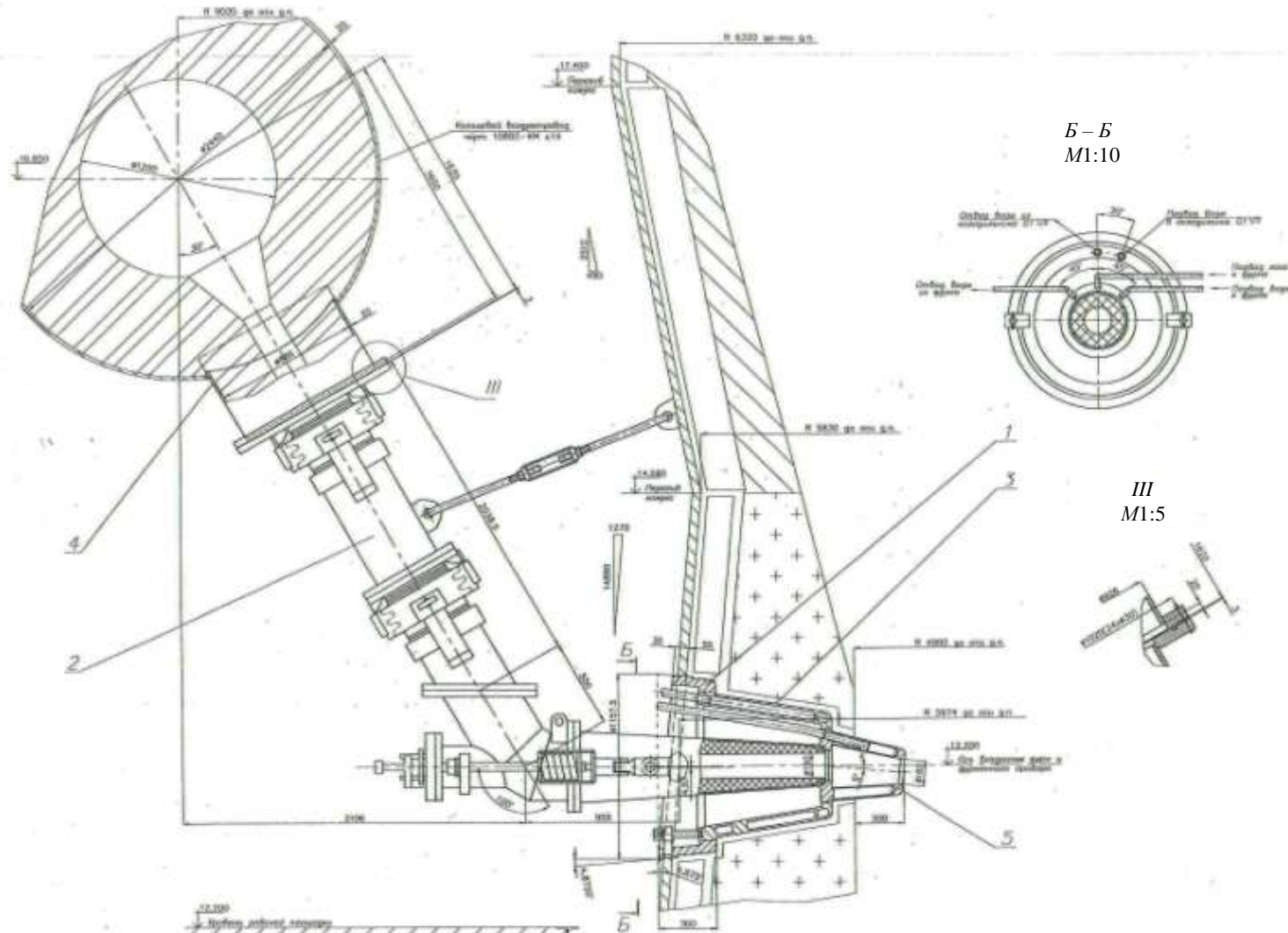


Рис. 6.5. Фурменный прибор доменной печи с сифонным компенсатором:
 1 – кадушка; 2 – цилиндрический воздухопровод; 3 – фурменный холодильник (амбразура);
 4 – стационарный патрубок; 5 – воздушная фурма

Из элементов фурменного прибора наиболее часто требует замены воздушная фурма. Самыми простыми типовыми конструкциями фурм являются литые медные и кованые из листовой меди (рис. 6.6). Первая конструкция цельнолитая, вторая выполняется из двух листов, свальцованных в конусные поверхности, с отбортовкой краев. Соединение швов производится электросваркой.

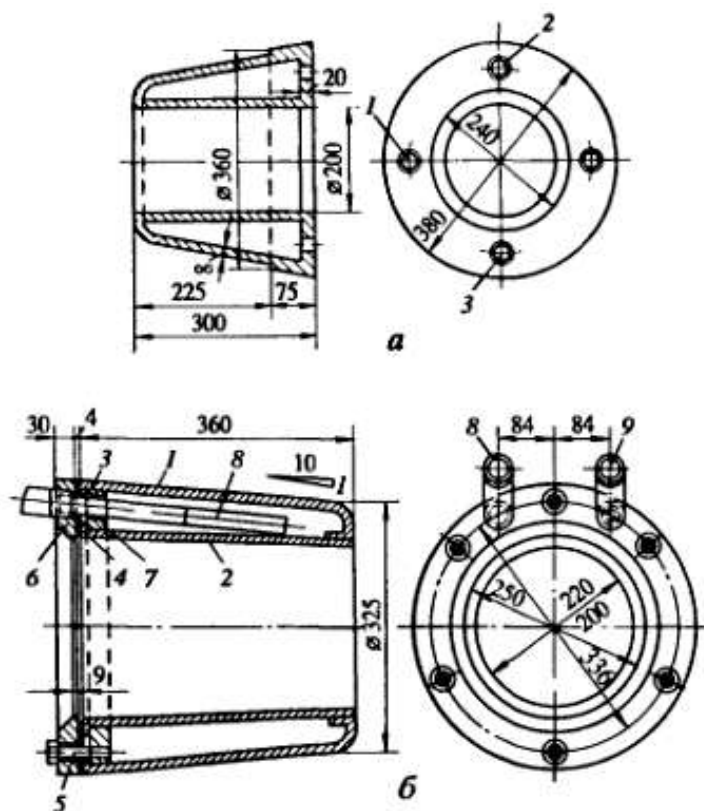


Рис. 6.6. Фурмы медные:

а – литые (1 – пробка; 2 – вход; 3 – выход); *б* – кованые (1, 2 – наружный и внутренний медные листы; 3, 4 – задние отбортованные края; 5 – зажимной болт; 6, 7 – фланцы; 8 – напорная трубка; 9 – выводная трубка)

Средняя стойкость воздушных фурм составляет 3–5 месяцев. Характерные причины выхода из строя воздушных фурм – прогар рыльной части (торцевой части) фурмы «снизу» и механические разрушения по сварке. Кроме того, при высокой температуре дутья (более 1000 °С) резко возрастают потери тепла с охлаждающей водой.

Горение фурм происходит в основном в результате их непосредственного контакта с большим количеством жидкого чугуна. При попадании на поверх-

ность фурмы «капель» чугуна плотность теплового потока в этой области резко возрастает, что вызывает кипение охлаждающей воды, образование паровой «рубашки» – пленки и последующее расплавление стенки фурмы. В этом случае для сохранения фурмы от нее должно отводиться $\sim 25 \cdot 10^6$ кДж/(м²·ч) тепла. При таком приходе тепла необходима скорость воды до 7 м/с, достичь которой практически невозможно.

В связи с этим фурмы, рассчитанные на повышенную стойкость, имеют ряд характерных отличий. Так, фурма конструкции комбината «Запорожсталь» имеет медный массивный носок толщиной до 90 мм, предназначенный для гашения воздействий масс жидкого чугуна (рис. 6.7).

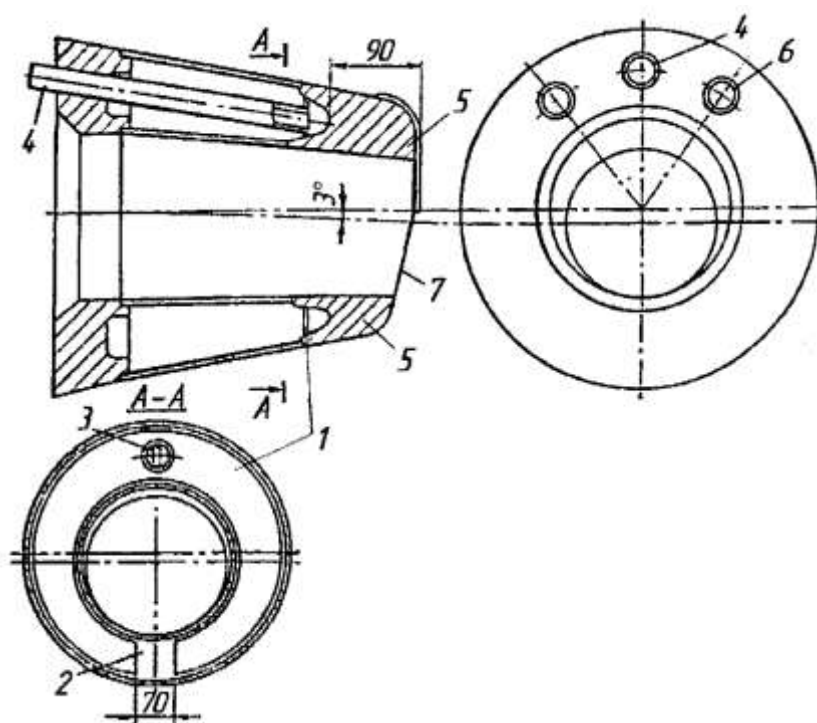


Рис. 6.7. Воздушная фурма доменной печи конструкции комбината «Запорожсталь»:

- 1 – стальная перегородка; 2 – выход воды из рыльной части;
- 3 – перегородка; 4 – подводящая трубка; 5 – рыльная часть;
- 6 – отводящая трубка; 7 – срез

Полость охлаждения фурмы превращена в 2-камерную. Скорость воды в носовой части составляет 4–5 м/с, а в общей полости – 0,3–0,4 м/с. Носовая полость фурмы имеет переменное сечение для ускорения истечения воды, что предупреждает образование пузырьков пара и пленочное кипение.

Верх рыльной части утолщен и наплавлен твердым сплавом для защиты меди от истирающего действия кокса, нижняя половина рыльной части имеет срез, предохраняющий низ фурмы от попадания на нее жидких продуктов плавки, а внутренний канал для дутья отклонен от горизонтали вниз на $3-4^\circ$. Продолжительность службы фурм Запорожского меткомбината в среднем достигала 9,2 мес.

На комбинате «Азовсталь» проведены длительные исследования стойкости воздушных фурм конструкции комбината «Запорожсталь». Опыт показал, что утолщенная часть фурмы быстро разрушается и укорачивается на 30–60 мм, поэтому толщину внутренней стенки носка уменьшили до 7–8 мм, толщину торца носка – до 40 мм сверху и до 30–40 мм внизу. Носок фурмы сверху наплавил твердым сплавом, а ввод природного газа заглубили к оси фурмы (рис. 6.8).

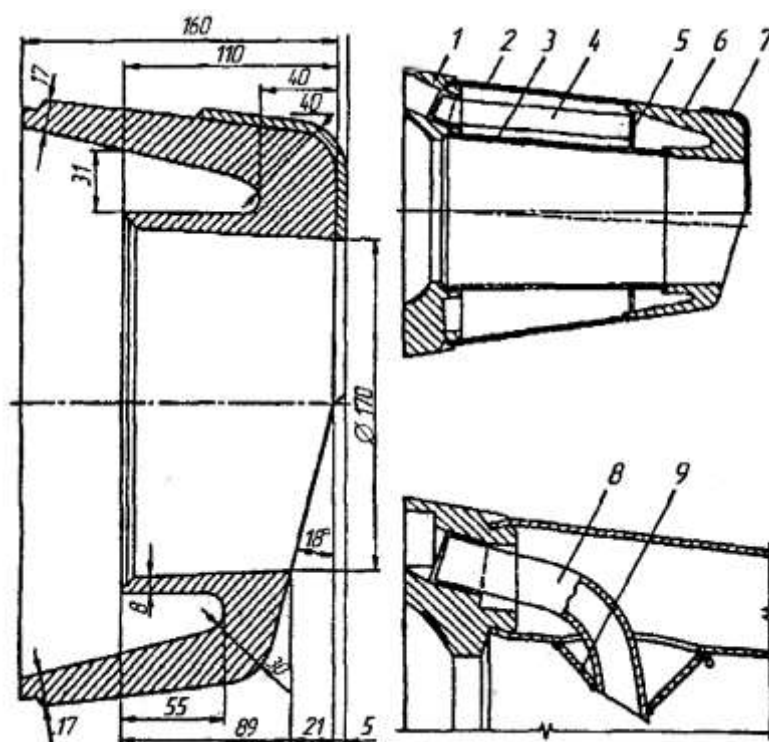


Рис. 6.8. Воздушная фурма с утолщенным носком усовершенствованной конструкции:

1 – фланец; 2, 3 – наружный и внутренний стаканы; 4 – трубка для отвода воды; 5 – перегородка; 6 – носок; 7 – наплавка твердым сплавом; 8 – трубка для ввода газа; 9 – охлаждающая полость

Для повышения стойкости фурм и уменьшения тепловых потерь проводят следующие мероприятия:

- рывльную часть воздушной фурмы защищают огнеупорными материалами, в том числе плазменным напылением;
- внутренний стакан фурмы футеруют огнеупорными материалами и изготавливают из стального листа вместо медного;
- совершенствуют качество сварных соединений, особенно на стыке элементов фурмы из меди и стали;
- повышают равномерность распределения газового потока.

В настоящее время в доменное производство внедряются футерованные медно-стальные воздушные фурмы (рис. 6.9). Их применение позволяет повысить срок службы защитного слоя, уменьшить потери тепла и значительно сократить расход дорогостоящей меди.

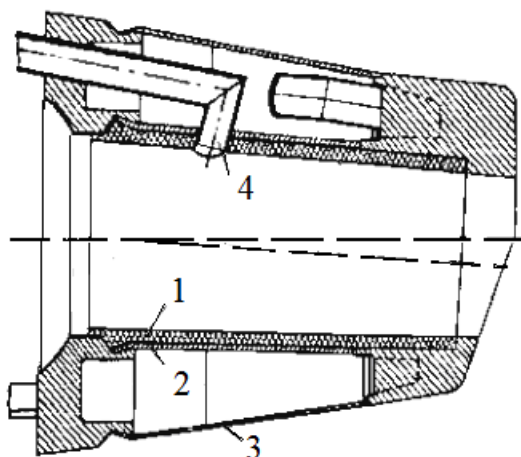


Рис. 6.9. Футерованная медно-стальная воздушная фурма:
1 – футеровка; 2 – стальной внутренний стакан; 3 – стальная часть наружного стакана; 4 – патрубок для ввода природного газа в поток дутья

На Череповецком металлургическом комбинате в целях увеличения стойкости фурм и снижения потерь тепла применяют фурмы, бронированные малотеплопроводным сплавом 40ХЮВМ, выдерживающим температуру более 2000 °С. Толщина носка увеличена до 95 мм, а носовая часть несколько скошена. Внутренний стакан фурм дополнительно оборудован огнеупорной вставкой из диоксида циркония (рис. 6.10).

Потери тепла с охлаждающей водой при среднем температурном перепаде $15,6^{\circ}$ составили 1190 тыс. кДж/ч для обычных фурм, а для бронированных фурм при перепаде $6,8^{\circ}$ – 427,4 тыс. кДж/ч, что эквивалентно снижению температуры горячего дутья соответственно на 53 и 23°C и свидетельствует о высокой эффективности бронирования. Бронированные фурмы, по данным разработчиков, прогорали только снизу от воздействия жидкого чугуна. Стойкость фурм составила 4–6 месяцев, что на 1,5–2,0 месяца больше по сравнению с обычными.

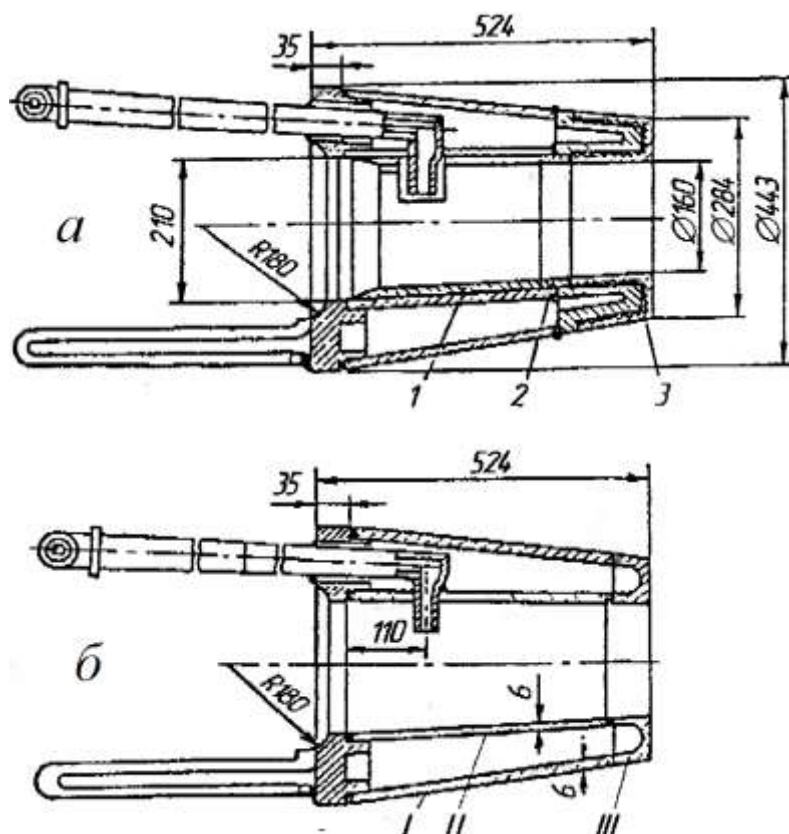


Рис. 6.10. Усовершенствованная (а) и обычная (б) фурмы для доменных печей Череповецкого металлургического комбината:
1, 3 – экран из сплава 40ХЮВМ; 2 – огнеупорная вставка из диоксида циркония; I, II, III – медные водоохлаждаемые части фурмы

Для устранения паровой пленки в рыльной части фурмы были разработаны конструкции фурм с вихревым и струйно-вихревым охлаждением внутренней полости путем применения направленных сопел, что позволяло достичь скорости воды в рыльной части более 8 м/с, однако это потребовало значительного увеличения давления охлаждающей воды.

На основании обобщения литературных и патентных материалов по проблеме воздушных фурм Институтом черной металлургии НАН Украины сделаны следующие выводы:

- один из решающих факторов, способствующий высокой стойкости воздушных фурм, – обеспечение ровности хода доменных печей;
- основной путь повышения срока службы воздушных фурм – оптимизация режима охлаждения корпуса фурмы;
- стойкость фурм повышает наклон центральной оси вниз на 2–15°.

Из всех рассмотренных вариантов конструкций воздушных фурм наиболее отвечают поставленным требованиям футерованные медно-стальные фурмы.

6.3. Определение прогара воздушных фурм

Существуют следующие причины выхода из строя воздушных фурм:

- воздействие капель и струек чугуна, попадающих на фурму;
- образование трещин в местах сварки (при сварных фурмах) или в местах перегибов;
- плохое охлаждение фурмы;
- физический износ фурмы.

Наиболее частой причиной прогара воздушных фурм является попадание на них капель и струй чугуна. Этому способствует также загромождение горна вязкими шлаками, применение непрочного кокса, дающее большое количество коксового мусора. Вероятность прожигания фурмы чугуном возрастает при холодном ходе доменной плавки, когда горн печи переполнен железистым холодным шлаком, в котором присутствует большое количество мелких капель чугуна. Прогар фурм возможен при ходе печи с осадками, когда происходит уменьшение емкости горна и поднятие уровня расплавов в горне печи, достижение чугуном уровня воздушных фурм и их горение. В этом случае прогар может быть в самых разных местах фурмы не только сверху и снизу, но и во внутренней ее полости.

Прогар фурм возможен при применении жесткой воды, когда внутри полости фурмы происходит отложение солей жесткости, уменьшение теплопроводности в местах отложения накипи и неизбежный прогар. К этому же приводит слабый напор охлаждающей воды и снижение интенсивности охлаждения. Поэтому недопустимо снижение давления воды при охлаждении фурм ниже 2–2,25 атм.

Выход из строя воздушных фурм из-за образования трещин и в местах перегибов обусловлен низким качеством их изготовления.

Износ фурм происходит вследствие истирающего действия опускающихся кусков кокса, поскольку они обладают очень сильным абразивным воздействием.

Прогар фурм может быть обнаружен по нижеследующим признакам.

1. По струйкам воды, бьющим из места прогара. Ударяясь о ближайшие куски кокса, вода охлаждает их и оставляет на поверхности куска кокса темный след. Однако такое явление на полном ходу печи обнаруживается только при сильном прогаре фурмы. При слабом прогаре сгоревшую фурму можно определить по ее «холодной работе» (уменьшается светимость фурмы), но наиболее надежно – на «тихом ходу» или при взятии печи на «Снорт». В этом случае возможно заметить даже небольшой прогар. Поэтому мастер и водопроводчик должны всегда использовать описанные режимы работы для осмотра воздушных фурм. При прогаре фурмы снизу наблюдение через глазок даже при значительном снижении расхода дутья не дает никаких визуальных признаков ее прогара.

2. Сгоревшая фурма может быть определена по характеру выходящей струи воды. Струя становится прерывистой и в ней появляются пузырьки газа. В некоторых случаях прогар фурмы сопровождается дрожанием выходящей сливной трубки.

3. Прогар фурмы или течь ее во фланец можно установить по появлению теплой воды на фурменном холодильнике или кадушке.

4. При сильном прогаре фурмы, когда в печь попадает много воды, повышается содержание водорода в газе. Однако этот признак является достоверным при отсутствии подачи в печь природного газа.

При попадании в горн воды из сгоревших воздушных фурм доменная печь выходит на похолодание, шлак становится коричневым или даже черным из-за возрастания в нем FeO , возрастает содержание серы и снижается содержание кремния в чугуне.

Всякая задержка смены сгоревшей фурмы приводит к попаданию воды в печь и похолоданию плавки, образованию «козла» у сгоревшей фурмы, что в значительной степени затягивает процесс смены фурмы, поскольку «козел» мешает правильной ее постановке. Часто удаление этого образования требует применения кислорода для выжигания «козла».

В практике бывают случаи частого горения одной и той же фурмы. Это обусловлено наличием отмеченного «козла». Для предотвращения горения фурмы по указанной причине ее на некоторое время закрывают (забивают глиной). При частом горении одной и той же фурмы старая практика ведения печи предполагала загрузку в сопло нескольких ведер марганцевой руды, а еще лучше – плавикового шпата (флюорита). Эти материалы способствуют снижению температур плавления шлаковых образований и расплавляют образовавшийся «козел».

6.4. Выбор количества воздушных фурм

При проектировании печи исключительно важным является вопрос о выборе числа воздушных фурм.

Имеются рекомендации по выбору необходимого числа фурм для печей различного объема. Некоторые из них приведены ниже.

$$\text{Павлов М. А.} \quad n = 2 \cdot d_{\text{r}} + 1; \quad (6.1)$$

$$\text{Райе О. Р.} \quad n = 2 \cdot d_{\text{r}} - 0,3; \quad (6.2)$$

$$\text{Остроухов М. Я.} \quad n = \frac{\pi \cdot d_{\Gamma}}{1,4} = 2,24 \cdot d_{\Gamma}; \quad (6.3)$$

$$\text{Леонидов Н. К.} \quad n = 2 \cdot d_{\Gamma}; \quad (6.4)$$

$$\text{Тихомиров Е. Н.} \quad n = 3 \cdot d_{\Gamma} - 8; \quad (6.5)$$

$$\text{Логинов В. И.} \quad n = \frac{25 \cdot \pi \cdot d_{\Gamma}}{44,5 - d_{\Gamma}}. \quad (6.6)$$

В приведенных уравнениях: n – число воздушных фурм, шт.;

d_{Γ} – диаметр горна печи, м.

Таким образом, четких рекомендаций по выбору оптимального числа воздушных фурм нет. Вероятно, наиболее правильная мысль была высказана в свое время М. А. Павловым, который предполагал, что оптимальное число фурм должно отвечать условию касания смежных фурменных очагов.

Рассмотрим это положение на примере расчета оптимального числа фурм для печи № 2 ОАО «Чусовской металлургический завод» полезным объемом 1033 м^3 , на которой установлено 14 фурм.

Исходные данные для расчета

Суточная производительность печи	$P = 1395 \text{ т/сут}$
Расчетный расход дутья	$Q = 1550 \text{ м}^3/\text{мин}$
Расход природного газа	$V_{\text{п.г}} = 68,2 \text{ м}^3/\text{т чугуна}$
Температура дутья	$t_{\text{д}} = 975 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Давление дутья	$P_{\text{д}} = 2,03 \text{ ати}$
Диаметр горна печи	$d_{\Gamma} = 7,2 \text{ м}$
Диаметр фурмы	$d_{\Phi} = 140 \text{ мм}$

Проведем расчеты фурменных очагов при установке 16 воздушных фурм.

Скорость истечения дутья из фурмы определяется из уравнения

$$V_{\text{ист}} = \frac{\left[Q + \frac{V_{\text{п.г}} \cdot P}{1440} \right] \cdot (t_{\text{д}} + 273) \cdot 77,73}{n \cdot d_{\Phi}^2 \cdot (1 + P_{\text{д}})}, \quad (6.7)$$

$$V_{\text{ист}} = \frac{\left[1550 + \frac{68,2 \cdot 1395}{1440} \right] \cdot (975 + 273) \cdot 77,73}{16 \cdot 140^2 \cdot (1 + 2,03)} = 165 \text{ м/с.}$$

Кинетическая энергия истечения дутья составляет

$$E = \frac{\left[Q \cdot 1,293 + 0,717 \frac{V_{\text{п.г}} \cdot P}{1440} \right]}{n \cdot 1177} \cdot V_{\text{ист}}^2, \quad (6.8)$$

$$E = \frac{\left[1550 \cdot 1,293 + 0,717 \frac{68,2 \cdot 1395}{1440} \right]}{16 \cdot 1177} \cdot 165^2 = 2965 \text{ кгм/с.}$$

Протяженность циркуляционной зоны для печей объемом до 1300 м^3

$$L_{\text{ц}} = 0,66 + 0,000083 \cdot E, \quad (6.9)$$

$$L_{\text{ц}} = 0,66 + 0,000083 \cdot 2965 = 0,91 \text{ м.}$$

Протяженность окислительной зоны (по 2 % CO_2 в газовой фазе) составляет

$$L_{\text{ок}} = 1,29 \cdot L_{\text{ц}}, \quad (6.10)$$

$$L_{\text{ок}} = 1,29 \cdot 0,91 = 1,17 \text{ м.}$$

Известно, что в плане окислительная зона фурменного очага представляет собой эллипс с коэффициентом сжатия большой и малой оси, равным 1,1–1,2, зависящим от скорости истечения дутья. При высове фурм 300 мм, протяженности окислительного очага 1,17 м и при диаметре горна 7,2 м значение среднего диаметра

$$d = 7,2 - 2 \cdot 0,3 - 1,17 = 5,43 \text{ м.}$$

Длина окружности составит $\pi \cdot 5,43 = 17,06 \text{ м}$. В то же время сумма малых осей окислительных зон при 16 фурмах $1,17 \cdot 0,9 \cdot 16 = 16,85 \text{ м}$. Таким образом, межфурменное расстояние между двумя смежными очагами составляет всего лишь 0,013 м.

В табл. 6.1 представлены расчетные данные о развитии фурменных очагов при 14 и 16 устанавливаемых фурмах различного диаметра (140 и 150 мм).

Таблица 6.1

Развитие фурменных очагов при различном числе фурм
и различном их диаметре

Параметр	Число воздушных фурм			
	14		16	
	Диаметр воздушных фурм, мм			
	140	150	140	150
Скорость истечения, м/с	188,6	164,2	165,0	143,7
Кинетическая энергия, кгм/с	4428	3357	2965	2249
Протяженность зоны циркуляции, м (по 2 % O ₂)	1,03	0,94	0,91	0,85
Протяженность окислительной зоны, м (по 2 % CO ₂)	1,32	1,21	1,17	1,09
Средний диаметр (по центру фурменного очага), м	5,28	5,39	5,43	5,51
Длина окружности по центрам фурменных очагов, м	16,59	16,93	17,06	17,31
Суммарная протяженность окислительных очагов, м	16,63	15,24	16,85	15,69
Перекрытие (+), разобшение (–) фурменных очагов, м	+ 0,003	–0,121	–0,013	–0,101

Таким образом, касания смежных фурменных очагов можно добиться как при 14, так и 16 фурмах, подбирая диаметр фурм и варьируя тем самым скорость истечения дутья и протяженность окислительных очагов. Безусловно, что увеличение числа воздушных фурм до 16 для доменной печи № 2 «ЧусМЗ» желательно, поскольку в этом случае следует ожидать более равномерного распределения газового потока и температуры по сечению печи. К примеру, увеличение числа фурм с 20 до 24 при реконструкции доменной печи объемом 2000 м³ Ново-Липецкого металлургического комбината привело к росту производительности печи на 10 % и позволило сократить расход кокса на 7 %.

7. ЗАГРУЗОЧНЫЕ УСТРОЙСТВА ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ

Шихтовые материалы загружаются в доменную печь с помощью засыпного (загрузочного) устройства.

Назначение загрузочного устройства состоит в следующем:

- загрузить в доменную печь шихтовые материалы при минимальных потерях колошникового газа;
- обеспечить направленное распределение материалов по окружности печи с возможностью управления окружным распределением;
- обеспечить распределение материалов по радиусу доменной печи.

Загрузочное устройство доменной печи работает в тяжелых условиях, подвергаясь ударам кусков шихты, истиранию потоками материалов и запыленных газов, а также воздействию высокой температуры. Поэтому конструкция его деталей должна быть прочной, износоустойчивой, надежной в работе, а при необходимости обеспечивать возможность быстрого выполнения ремонта.

Настоятельная необходимость в разработке загрузочного устройства возникла с момента попыток использования отходящего из печи газа в качестве газообразного топлива, который ранее выходил из печи через открытый колошник. Из многочисленных предложенных устройств предпочтение в конечном итоге было отдано загрузочному аппарату с одноконусным колошниковым затвором, разработанному в 1850 г. англичанином Пари. Дальнейшим усовершенствованием этой конструкции явилось создание второго конусного затвора – малого конуса, устраняющего потери газа в атмосферу в процессе загрузки материалов в печь, и вращающегося распределителя шихты «Мак-Ки» (США, 1907) для регулирования окружного распределения шихты на колошнике печи.

Распределитель «Мак-Ки» подвергался неоднократным усовершенствованиям, результатом которых явилась конструкция вращающегося распределительного устройства – ВРШ. Устанавливаемый на загрузочном аппарате ВРШ применяется в настоящее время даже для крупных печей объемом 2700–3200 м³.

7.1. Двухконусное загрузочное устройство

Двухконусное загрузочное устройство доменной печи показано на рис.

7.1. Оно включает:

- приемную воронку 28;
- засыпной аппарат, состоящий из большого конуса 2, чаши большого конуса 1 и штанги 9;
- газовый затвор 6;
- распределительный аппарат, состоящий из малого конуса 8, воронки ВРШ 7 и полый штанги 10;
- устройство для маневрирования конусами.

Загрузочный аппарат верхним фланцем опирается на колошниковый фланец 26, приваренный к верхней части купола печи.

Чаша большого конуса 2 (рис. 7.2) изготавливается из литой углеродистой стали марки 35Л (0,28–0,39 % углерода) с толщиной стенки 50–60 мм. Она представляет собой расширяющийся кверху усеченный конус с образующей под углом 85–86°, контактная поверхность которой, примыкающая к большому конусу, упрочняется твердыми сплавами: сталинитом, сормайтотом (на основе карбидов Сг) или композиционным сплавом (на основе карбидов W) с последующей шлифовкой.

Большой конус 3 (рис. 7.2) обычно изготавливается из той же марки стали, что и чаша. Конус выполняется цельнолитым с толщиной стенки 50–60 мм и диаметром до 6500 мм. Угол наклона образующей конуса составляет не менее 52–53°, а ряде случаев делается равным 60–62° для лучшего контакта поверхности конуса с чашей. Форма контактной поверхности в последнем случае выполняется сферической с центром сферы на оси конуса. Поверхность конуса упрочняется так же, как и чаша, твердыми сплавами с последующей шлифовкой. Основание конуса по внутренней окружности усиливается фланцем жесткости с равномерно расположенными по нему ребрами.

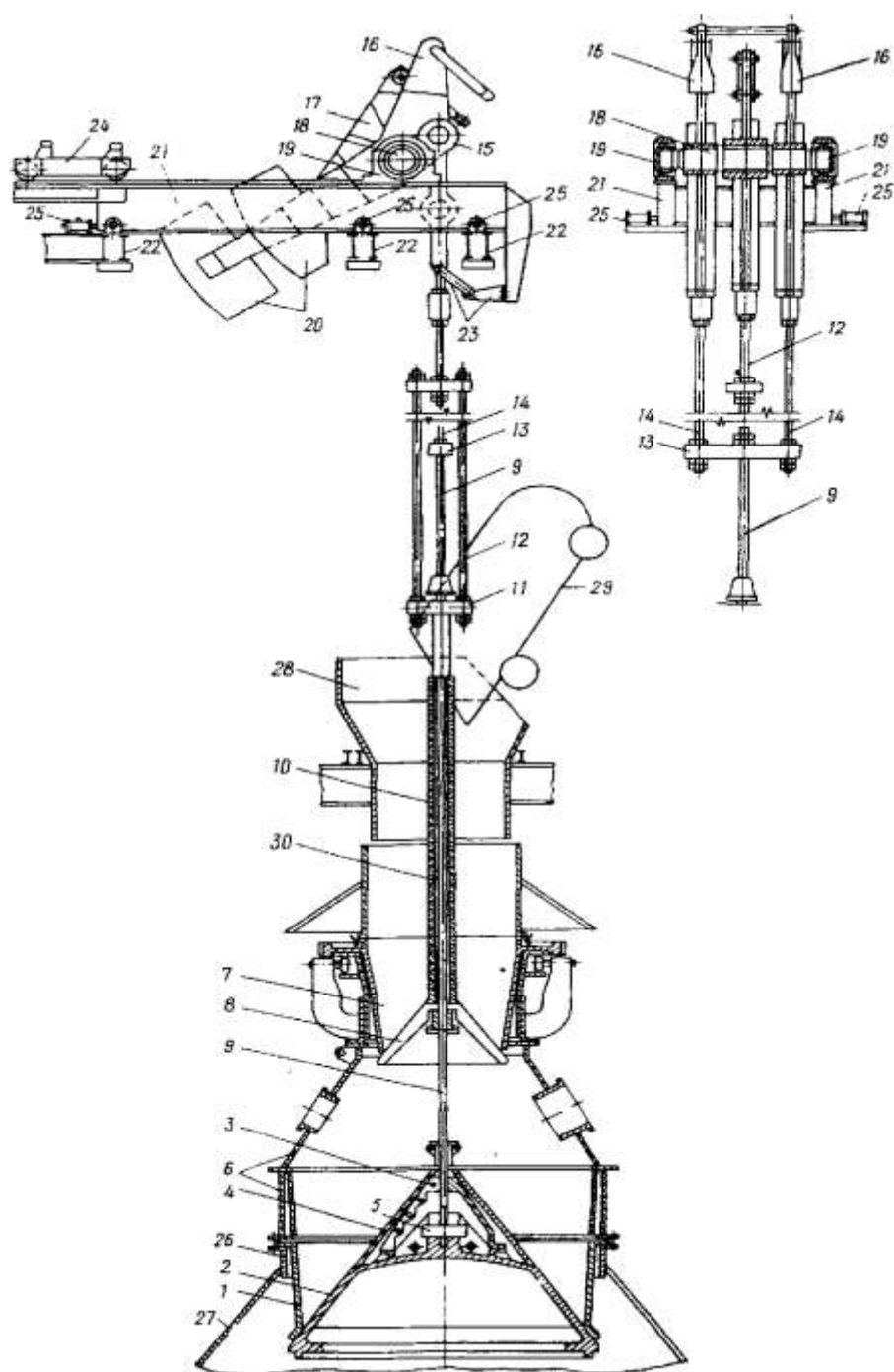


Рис. 7.1. Схема загрузочного устройства доменной печи (в сборе):

1 – чаша большого конуса; 2 – большой конус; 3 – конус жесткости; 4 – защитный конус; 5 – клин; 6 – газовый затвор; 7 – распределитель шихты; 8 – малый конус; 9 – штанга большого конуса; 10 – штанга малого конуса; 11 – траверса штанги малого конуса; 12 – тяги малого конуса; 13 – траверса штанги большого конуса; 14 – тяги большого конуса; 15 – прямоило; 16 – балансиры большого конуса; 17 – балансир малого конуса; 18 – ось балансиров; 19 – подшипники балансиров; 20 – контргрузы; 21 – подбалансирующая рама; 22 – балки балансирующей рамы; 23 – пантограф (направляющее устройство); 24 – тележка для поддержания балансиров; 25 – гидравлические домкраты для передвижки балансиров; 26 – колошниковый фланец; 27 – купол печи; 28 – воронка; 29 – скип; 30 – защитные кольца штанги малого конуса

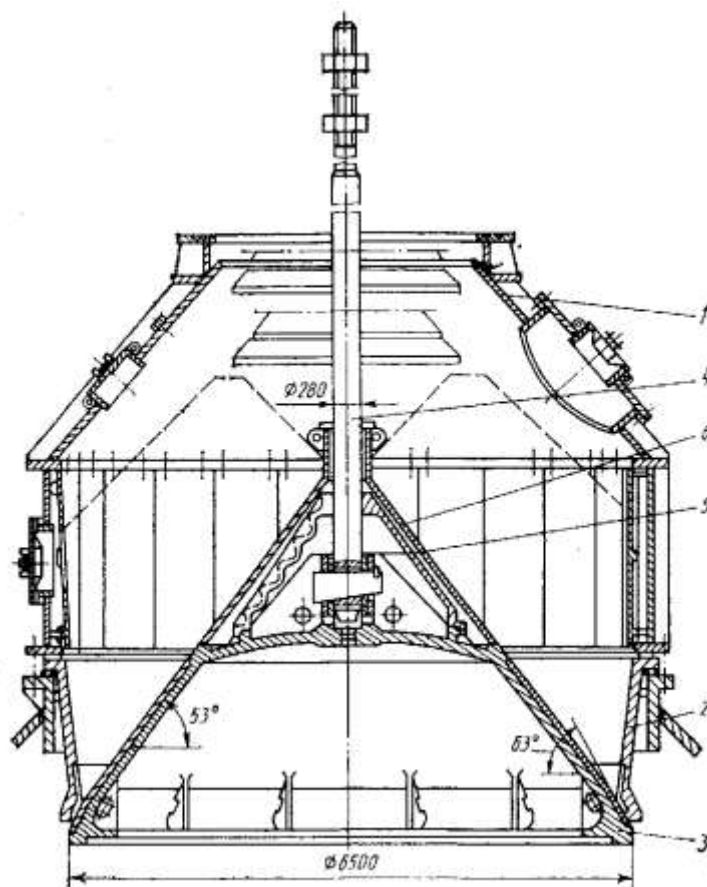


Рис. 7.2. Засыпной аппарат:

1 – газовый затвор; 2 – чаша большого конуса; 3 – большой конус;
4 – штанга большого конуса; 5 – конус жесткости; 6 – защитный конус

После отливки большой конус подвергается высокотемпературному обжигу для снятия внутренних напряжений, затем производится наплавка твердыми сплавами, механическая обработка и шлифовка контактной поверхности. Конус тщательно балансируется для предупреждения раскачиваний и ударов о чашу. Для предупреждения перегрузок устройств для маневрирования конусами масса конуса не должна превышать расчетную массу более чем на 15 %.

Штанга 4 (рис. 7.2) конуса проходит через вершину малого конуса и внутри его штанги. Она делается цельнокованой из стали марки 15. Ее диаметр для печей среднего и большого объема достигает 185–190 мм, а длина – 15 м. Поверхность штанги тщательно обрабатывается по всей длине, а в месте прохождения через сальниковое уплотнение – шлифуется.

Крепление штанги конуса с чашей производится посредством стакана в верхней части конуса, куда вставляется торец штанги с прорезью. Их сочлене-

ние осуществляется посредством клина, в который вставляется чека, предотвращающая выпадение клина. Узел сочленения штанги с большим конусом предохраняется от ударов шихты сварным защитным конусом, состоящим из двух частей, которые при монтаже аппарата привариваются к большому конусу.

Слабым местом засыпного аппарата является место контакта конуса с чашей. При работе печи с повышенным давлением колошникового газа контактная поверхность подвергается износу в связи с перетоком запыленного газа из-за различия давлений газа под большим конусом и в межконусном пространстве.

Срок службы контактных поверхностей засыпного аппарата зависит от избыточного давления газа на колошнике. Время службы засыпного аппарата связано с избыточным давлением колошникового газа простой зависимостью

$$\tau = \frac{12,2}{\Delta P}, \quad (7.1)$$

где τ – время службы засыпного аппарата, мес;

ΔP – избыточное давление колошникового газа, ати.

Имеется мнение, что предельное значение избыточного давления газа, превышение которого уже не сопровождается сокращением срока службы загрузочных устройств, составляет $\Delta P = 2,0$ ати. Однако ряд исследователей полагают, что первопричиной износа контактных поверхностей является скорость движения газа в зоне контакта чаши с конусом, которая в реальных условиях составляет 250–270 м/с, а для достижения предельных скоростей движения газа в неплотностях (около 570 м/с) необходимо иметь перепад давлений газа около 40 атм. Таким образом, увеличение давления колошникового газа в реальных пределах сопровождается снижением срока службы деталей засыпного аппарата.

Одной из причин, вызывающих появление зазоров в контактных поверхностях конуса и чаши, является неравномерность распределения газового потока по окружности печи. Вследствие различия температур, достигающих до 200–250°, образуются зазоры размером 2–3 мм, которые невозможно устранить никакими усилиями поджатия конуса к чаше.

Основные мероприятия для увеличения срока службы засыпного аппарата:

- осуществление отсева мелочи из шихтовых материалов. Это мероприятие не только улучшает газопроницаемость слоя шихты в печи и увеличивает ее производительность, но и снижает запыленность газового потока, что способствует увеличению срока службы засыпного устройства;
- равномерное распределение газового потока по окружности печи;
- тщательное изготовление деталей засыпного устройства;
- исключение загрузки в печь горячего агломерата.

Сверху засыпной аппарат закрывается газовым затвором 1 (рис. 7.2). Он предназначен для отделения межконусного пространства от атмосферы и предотвращения выхода газа из печи при открывании большого конуса. Затвор представляет собой сварной цилиндро-конический кожух, состоящий из двух соединенных болтами и приварными планками частей. Нижним фланцем затвор опирается на фланец чаши. Верхний фланец газового затвора предназначен для установки на нем распределителя шихты. Для защиты от износа шихтовыми материалами цилиндрическая часть затвора футерована съемными марганцовистыми плитами. В верхней конической части газового затвора имеется четыре люка: три малых круглой формы – для ремонта и осмотра засыпного аппарата и один большой овальной формы – для извлечения и установки частей малого конуса распределителя шихты при их замене. В цилиндрической части затвора имеется два ремонтных люка.

Внутренний объем газового затвора должен быть не менее объема четырех скипов для возможности формирования подачи.

На верхнем фланце газового затвора устанавливается распределительный аппарат (рис. 7.3). Необходимость его использования связана с тем, что при односторонней выгрузке материалов из скипов в воронке малого конуса образуется естественный откос, дающий неравномерную по толщине укладку материалов. Кроме этого, при высыпании материалы сегрегируют по крупности: мелочь сосредотачивается на стороне высыпания, а крупные куски – на противоположной стороне. Такая неравномерность укладки материалов сохраняет-

ся при высыпании на большой конус и с большого конуса – в печь, что несовместимо с равномерным распределением газового потока.

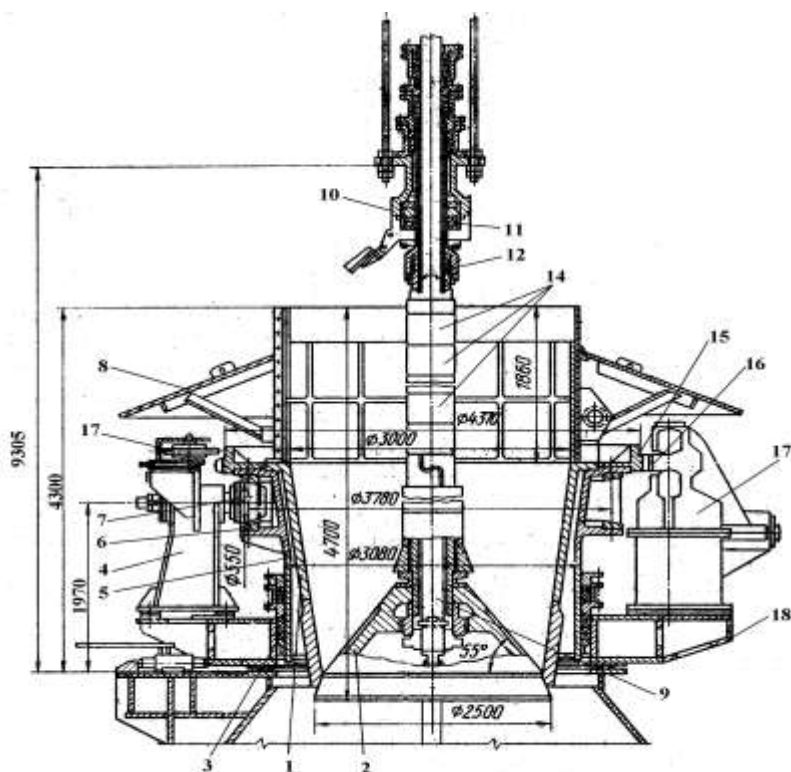


Рис. 7.3. Вращающийся распределитель шихты:

1 – вращающаяся воронка; 2 – малый конус; 3 – сальниковые уплотнения; 4 – стойка; 5 – корпус; 6 – беговые дорожки; 7 – опорные ролики; 8 – зонт; 9 – штанга малого конуса; 10 – обойма; 11 – подшипник; 12, 13 – головки; 14 – кольца; 15 – зубчатый венец; 16 – шестерня; 17 – конический редуктор; 18 – опорное кольцо

Основными узлами распределительного аппарата являются вращающаяся воронка с механизмом вращения, малый конус со штангой, привод, сальниковые уплотнения с централизованной смазкой.

Малый конус 2 (рис. 7.3) выполняется либо цельнолитым, либо составным из двух частей, стыкующихся в вертикальной плоскости болтами. Конус отливается из углеродистой стали и в зоне контакта с воронкой и по всей рабочей поверхности наплавляется твердым сплавом в целях увеличения его стойкости. Угол наклона образующей малого конуса делается равным 53–55°.

Штанга 9, служащая для подвески конуса, выполняется полой из цельнотянутой толстостенной трубы. На концевых участках штанги нарезается резьба,

служащая, с одной стороны, для крепления конуса, а с другой – для опоры штанги с конусом на роликовую опору для осуществления вращения распределительного аппарата. Штанга предохраняется от износа надетыми на нее футеровочными кольцами из износостойкой стали 14. Над роликовой опорой монтируется трехъярусное сальниковое уплотнение, предохраняющее выход колошникового газа между штангами большого и малого конусов.

Вращающаяся воронка 1 выполняется из углеродистой или марганцовистой стали цельнолитой или сваренной из двух литых частей. Эта воронка в нижней части изнутри на высоту 650–800 мм наплавляется твердым сплавом для защиты от абразивного износа. Полезный объем вращающейся воронки соответствует полезному объему скипа.

Корпус воронки 5 снабжен двумя (верхней и нижней) беговыми дорожками. Одной из этих дорожек (в зависимости от направления действующего вертикального усилия) вращающаяся воронка опирается на опорные конические ролики 7. На верхнем фланце корпуса посредством болтов закрепляется литой зубчатый венец 15, находящийся в зацеплении шестерней 16 конического редуктора 17.

В кольцевом зазоре между опорным кольцом и вращающимся корпусом воронки устанавливается двухъярусное сальниковое уплотнение 3, предохраняющее выход колошникового газа из межконусного пространства в атмосферу. В качестве уплотняющего элемента применяется специальная асбестовая прографиченная набивка с медной проволокой.

Каждый ярус уплотнения поджимается своей гран-буксой и имеет независимый подвод густой смазки.

К верхней части воронки прикреплен стальной зонт 8, защищающий элементы механизма вращения от попадания на них кусков шихты.

Привод распределителя шихты в целях защиты от воздействия горячего колошникового газа и обеспечения удобства обслуживания выполняется выносным и соединяется с приводным валом конического редуктора муфтами и промежуточным валом.

Распределитель работает в автоматизированной системе загрузки доменной печи по заданной программе. Привод его связан электрическими блокировками с другими механизмами системы загрузки. В частности, вращение воронки распределителя возможно лишь при закрытом малом конусе; невозможно опускание малого конуса до полной остановки ВРШ; вращение ВРШ возможно лишь после начала движения порожнего скипа.

При загрузке шихтой воронка распределителя остается неподвижной, а после ее наполнения вместе с прижатым к ней конусом начинает вращаться на заданный угол.

При работе доменных печей с повышенным давлением газов на колошнике межконусное пространство загрузочного устройства перед срабатыванием большого конуса периодически наполняется газом с давлением, равным печному, и освобождается от него перед опусканием малого конуса.

Заполнение межконусного пространства осуществляется из газопровода 1 (рис. 7.4) получистого газа с помощью уравнительного клапана большого конуса 2. Обратное снижение давления до атмосферного делается уравнительным клапаном малого конуса 3 через выхлопные трубы. Листовая задвижка 4 используется для отключения клапанов от печи во время ремонтов.

Различаются основной и дополнительный режимы работы уравнительных клапанов. При основном режиме межконусное пространство заполняется получистым газом повышенного давления непосредственно перед опусканием большого конуса, а после обратного его подъема – сообщается с атмосферой.

При дополнительном режиме повышенное давление в межконусном пространстве сохраняется постоянно, за исключением отрезков времени, в течение которых происходит срабатывание малого конуса. Он применяется при наличии неплотностей в сопряжении большого конуса с чашей. В настоящее время этот режим стал основным в связи с переводом доменных печей на работу с повышенным давлением газа под колошником. При этом режиме с большого конуса снимаются функции газового затвора. Последнее значительно увеличило работоспособность загрузочного аппарата.

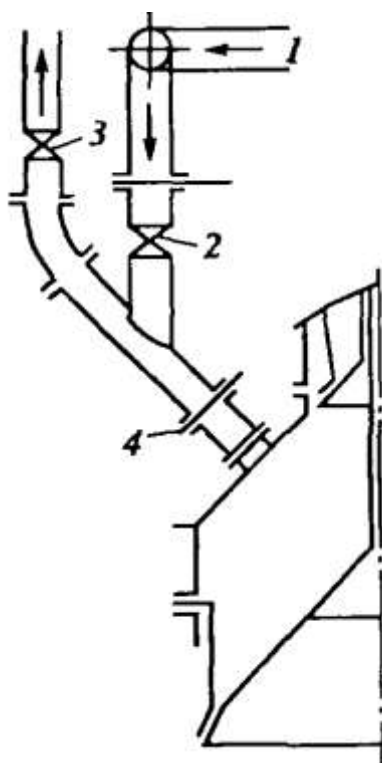


Рис. 7.4. Схема расположения уравнивающих клапанов

Вращающийся распределитель может работать в различных режимах. Наиболее часто применяется программа работы на 6 станций, предусматривающая изменение положения ВРШ на 60° (0, 60, 120, 180, 240, 300°) после каждого опускания малого конуса. Возможно применение и других программ, в частности – на 12 станций, преследуя при этом цель повысить равномерность распределения шихтовых материалов по окружности колошника печи. При нарушении хода печи с образованием канального потока заданная работа распределителя корректируется или полностью изменяется для устранения расстройства хода.

Для опускания и подъема большого и малого конусов засыпного и распределительного аппаратов служат устройства для маневрирования конусами.

К устройствам предъявляется ряд требований:

- опускание конусов, подвешенных к балансирам, должно происходить строго вертикально. Допустимое горизонтальное отклонение не должно превышать 1–2 мм;

- моменты усилий, действующих в балансирной системе, должны быть такими, чтобы исключить возможность самостоятельного открытия конусов;
- для центровки балансирной системы должна быть предусмотрена возможность передвижения опор балансиров в двух взаимно-перпендикулярных направлениях не менее чем на 100 мм;
- в схеме устройств балансирной системы должны быть учтены опасные ситуации: приваривание конусов к чашам, повышение уровня шихты сверх заданного;
- кинематическая схема механизмов маневрирования конусами должна гарантировать невозможность открытия обоих конусов (большого и малого) одновременно;
- время опускания конусов и выдержки их в открытом положении должно быть регламентировано, поскольку это влияет на распределение материалов на колошнике печи;
- взрывы газа в межконусном пространстве не должны приводить к разрушению устройств маневрирования конусами.

Балансирное устройство (рис. 7.5) устанавливается на сварной раме 1, которая является опорой, и болтами закрепляется на балках копра. На раме смонтированы два подшипника качения, в которых размещается ось, несущая на себе балансиры большого и малого конусов. Балансиры – это двуплечие рычаги сварной конструкции, качающиеся независимо друг от друга.

Балансир большого конуса выполняется в виде двух связанных между собой, совместно работающих рычагов, сидящих на оси и несущих на длинном плече контргруз 7, а коротким плечом соединяющихся посредством канатов 3 с лебедкой управления конусами. На коротком рычаге ближе к центру их качания подвешены промежуточные шатуны 4, к центру которых посредством подвесок присоединяется штанга большого конуса.

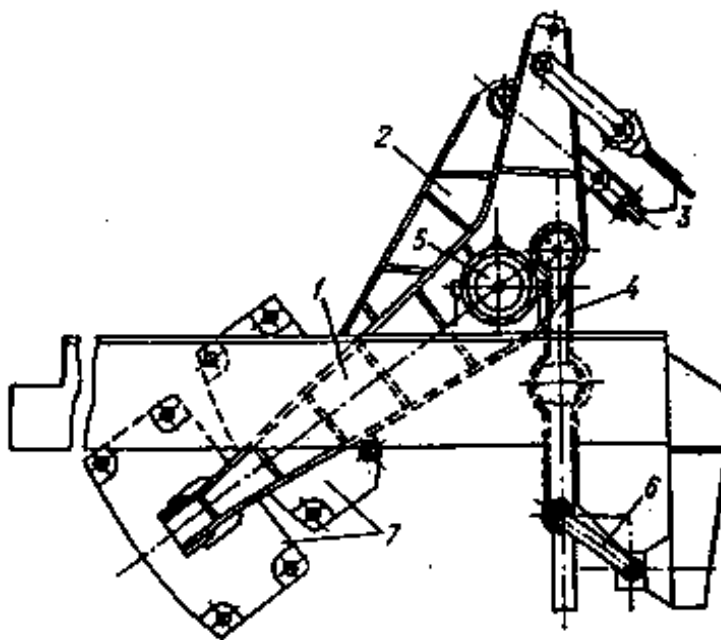


Рис. 7.5. Балансиры конусов загрузочного устройства

Радиусы дуг, по которым перемещаются концы шатуна при вращении балансира вокруг оси, одинаковы, и точка подвеса штанги конуса, расположенная точно в средней точке шатуна, опускается в этом случае строго по вертикали.

Балансир малого конуса выполнен в виде одинарного рычага и располагается между рычагами большого конуса.

Сопряжение вращающейся штанги малого конуса с неподвижными подвесками балансиров осуществляется с помощью роликовой обоймы (рис. 7.6).

Штанга малого конуса 4 в верхней части имеет фланец 2, при помощи которого опирается на ролики 3. Ролики поддерживаются обоймой 1, которая не вращается и крепится к подвескам. Последние, в свою очередь, прикреплены к балансиру малого конуса.

Для маневрирования большим и малым конусом используется лебедка. Схематичное изображение лебедки показано на рис. 7.7.

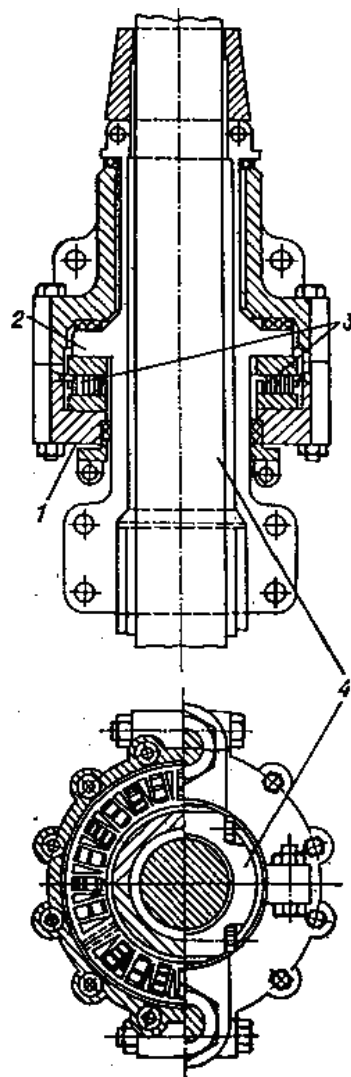


Рис. 7.6. Роликовая обойма штанги малого конуса

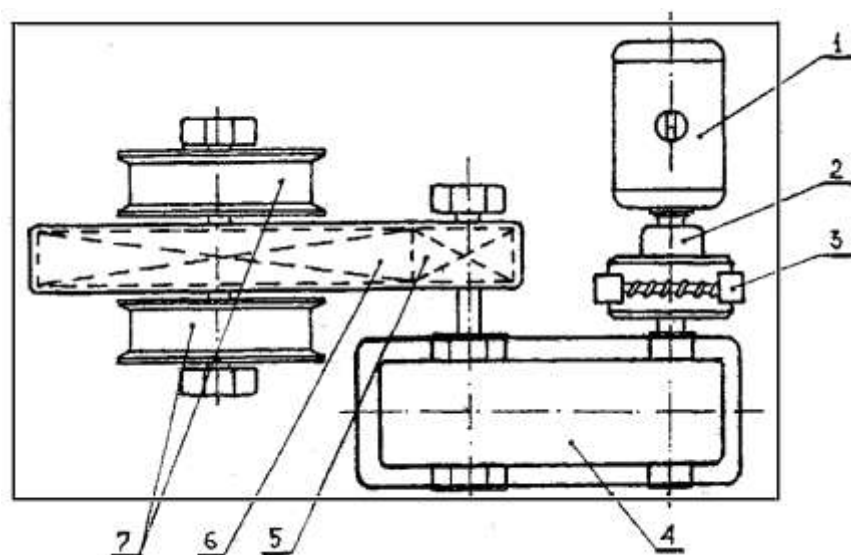


Рис. 7.7. Лебедка для маневрирования конусами (схема):
1 – двигатель; 2 – муфта; 3 – тормоз; 4 – редуктор; 5 – шестерня;
6 – зубчатое колесо; 7 – барабаны

Оборудование лебедки включает в себя электродвигатель 1, двухступенчатый цилиндрический редуктор 4, который соединен с двигателем эластичной муфтой 2 с тормозным шкивом. На муфте устанавливается колодчатый короткоходовой тормоз 3. На выходном валу редуктора насажена шестерня 5, входящая в зацепление с большой шестерней 6, сидящей на грузовом валу. Зубчатое колесо (большая шестерня) сидит на рабочем валу неподвижно, а барабаны 7 вращаются на нем (их два: один для большого, другой для малого конуса).

На зубчатом колесе и барабанах имеются приливы – кулачки, расположенные так, что при вращении колеса от среднего положения в одну сторону оно сцепляется с барабаном большого конуса, а при вращении от указанного положения в другую сторону – с барабаном малого конуса. Лебедка работает реверсивно. Угол поворота барабана не превышает 320° . Наматывание каната на барабан вызывает опускание конуса, а сматывание (под действием контргрузов балансира) – их подъем. Таким образом, кинематическая схема лебедки исключает возможность одновременного открытия конусов.

Повышение давления газа на колошнике и увеличение размеров доменных печей создали существенные трудности при эксплуатации обычных двухконусных загрузочных аппаратов. Участились случаи продувов в контактных поверхностях большого конуса и его чаши. Появились также продувы по контактным поверхностям малого конуса и вращающейся воронки, в ее сальниковых уплотнениях и между штангами конусов. В результате этого при работе доменной печи на повышенном давлении газа в рабочем пространстве, несмотря на наплавку поверхности соприкосновения конуса и чаши специальными износостойчивыми сплавами, срок службы большого конуса не превышает одного года.

Необходимость увеличения срока службы загрузочных устройств доменной печи привела к разработке ряда оригинальных конструкций. В настоящее время созданы загрузочные устройства, улучшающие распределение шихтовых материалов при загрузке в доменную печь, с повышенной стойкостью основ-

ных конструктивных элементов, работающих при повышенном давлении газа под колошником.

Широкое распространение получили двухконусные загрузочные устройства с газоплотнительными клапанами конструкции фирмы «Исикавадзима Харима Дзюкоге» (Япония), установленные на доменных печах полезным объемом 1250–4000 м³ и более (рис. 7.8). Эти загрузочные устройства разработаны в двух вариантах: для скиповой и конвейерной систем подачи материалов на колошник. Большой конус в этом устройстве выполняет функцию распределения шихты, в то время как газоплотность обеспечивается газоплотнительными клапанами и малым конусом. Эксплуатация подобных устройств показала, что большой конус без замены может работать длительное время.

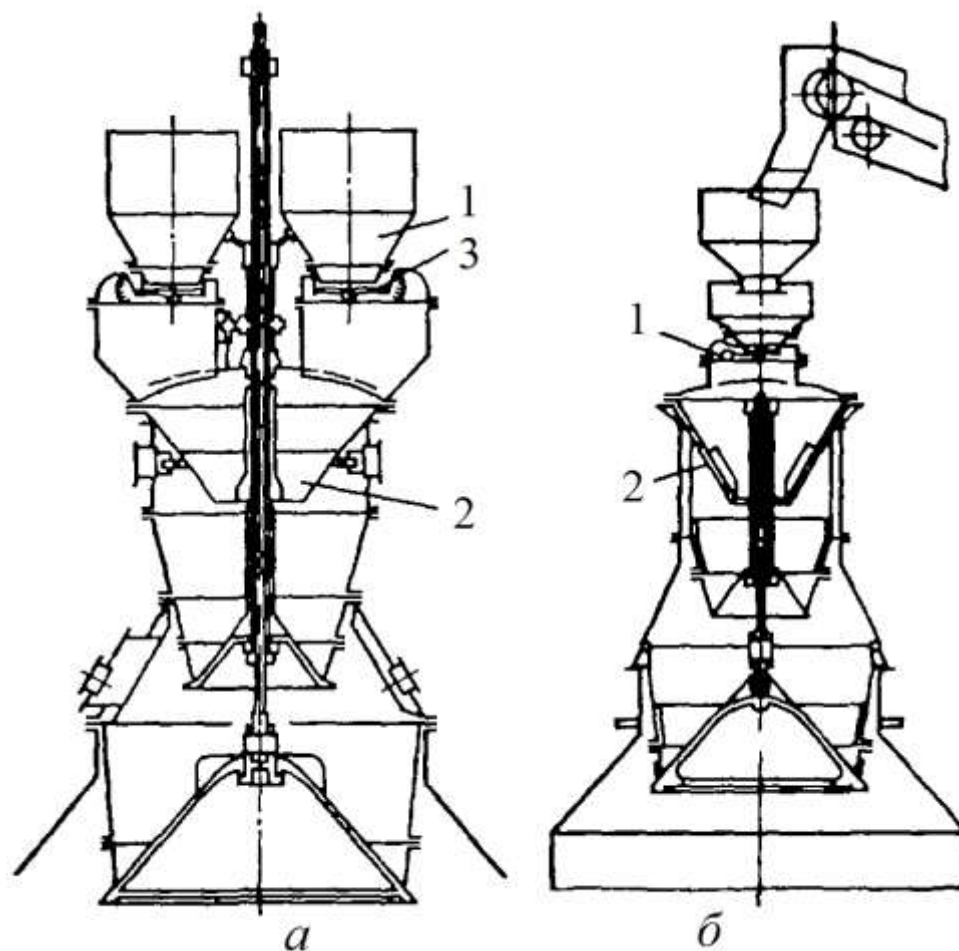


Рис. 7.8. Загрузочные устройства с газоплотнительными клапанами конструкции фирмы «Исикавадзима Харима Дзюкоге» для варианта подачи материала: *а* – скипами: 1 – приемная воронка; 2 – вращающийся желоб; 3 – газоплотнительный клапан; *б* – конвейерами: 1 – газоплотнительный клапан; 2 – стационарный желоб

При скиповой подаче материалов устройство состоит из двух приемных воронок (по одной для каждого скипа), закрывающихся снизу газоплотнительными клапанами. Клапаны открываются перед разгрузкой материала из скипа и закрываются после высыпания материала из приемной воронки. Во время высыпания материала диск клапана находится в положении, недосягаемом для материала. Диск и седло клапана изготовлены из высокопрочной легированной стали. Для повышения газоплотности клапана дополнительно установлено резиновое седло, расположенное таким образом, чтобы его не касались загружаемые материалы. Высыпавшиеся из приемной воронки материалы попадают во вращающийся желоб (рис. 7.9) с двумя симметрично расположенными отверстиями в боковой стенке.

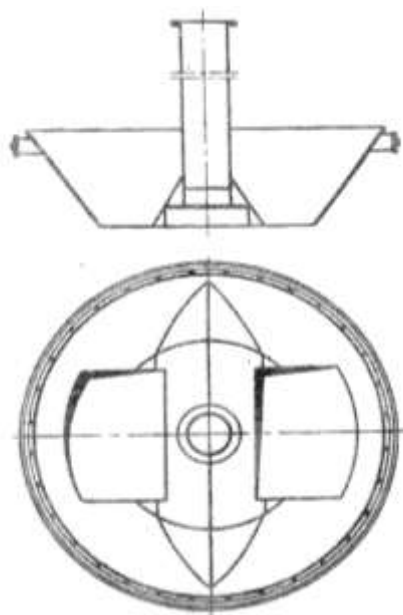


Рис. 7.9. Вращающийся распределительный желоб

Желоб подвешен на центральном трубчатом валу, на который насажена цилиндрическая шестерня. Шестерня и желоб поддерживаются тремя верхними, тремя нижними и шестью боковыми роликами. На верхней кромке малого конуса установлен приводной механизм, с помощью которого желоб вращается или устанавливается в заданной позиции. При конвейерной подаче материалов на колошник вместо вращающегося желоба применяют стационарный. Сырьевые материалы с ленточного конвейера сыплются по раздвоенному желобу в

две стационарные приемные воронки. Дно каждой из них закрывается откидным затвором, под которым расположен газоплотнительный клапан, открывающийся перед открытием и закрывающийся после закрытия приемной воронки.

На доменных печах большого объема устанавливаются загрузочные устройства с газоотсекающими клапанами и вертикально перемещающимся распределителем шихты. Такое загрузочное устройство (рис. 7.10) состоит из приемных бункеров 12, промежуточных шихтовых бункеров 11, расположенного под ними вращающегося распределителя 8, конуса 5 с чашей (воронкой) 6, ниже которого в рабочем пространстве печи находится подвижный по вертикали распределитель шихты 1. Каждый из шихтовых бункеров снабжен верхним и нижним газоотсекающими клапанами 9. Для предохранения нижних клапанов от изнашивания материалами над ними расположены шихтовые затворы 10.

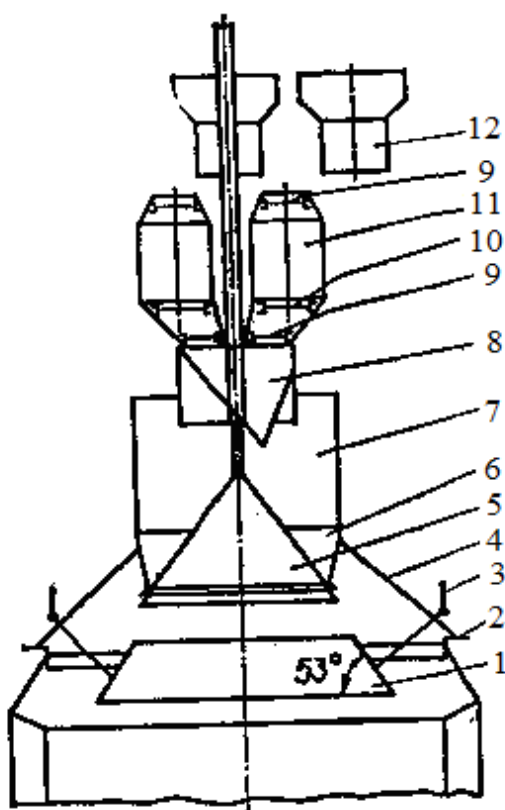


Рис. 7.10. Загрузочный аппарат с газоотсекающими клапанами и вертикально перемещающимся распределителем шихты:

1 – распределитель шихты; 2 – опорное колошниковое кольцо; 3 – привод распределителя шихты; 4 – основание; 5 – конус со штангой; 6 – чаша (воронка) конуса; 7 – газовый затвор; 8 – вращающийся распределитель со штангой; 9 – клапаны газоотсекающие; 10 – затвор шихтовый; 11 – бункер промежуточный; 12 – бункер приемный

Шихтовые материалы подъемником (конвейерным или скиповым) подаются в приемный бункер, из которого с помощью поворотного желоба поступают в промежуточный бункер. После заполнения промежуточного бункера порцией материалов закрывается верхний газоотсекающий клапан. Из промежуточного бункера, при открытии шихтового затвора и нижнего газоотсекающего клапана, шихта поступает во вращающийся распределитель, представляющий собой воронку с односкатным днищем, подвешенную к штанге, с помощью которой воронка приводится во вращение. Вращающийся распределитель может работать как по станциям, так и в режиме непрерывного вращения. С вращающегося распределителя шихта поступает на конус. После набора подачи конус открывается, и материалы загружаются в печь.

Если верхняя кромка распределителя шихты находится ниже опущенного конуса, то материал по образующей распределителя направляется к стенкам колошника. Причем изменение расстояния между верхней кромкой распределителя и конусом приводит к некоторому изменению положения гребня материалов в периферийной зоне. Если же верхняя кромка распределителя шихты находится выше контактной поверхности конуса и воронки, то шихтовые материалы сбрасываются в печь непосредственно с конуса, минуя распределитель шихты, и располагаются в печи ближе к центральной зоне колошника.

Корректировка распределения шихтовых материалов на колошнике производится также подвижными по высоте распределительными кольцами, установленными в подконусном пространстве колошника. Такое кольцо впервые было установлено в 1910 г. доменщиком Г. Г. Поносовым на одной из доменных печей Надеждинского (ныне Серовского) завода на Урале. Эти кольца являются существенным дополнением к вращающемуся распределителю шихты при эксплуатации печей, оборудованных конусными засыпными аппаратами.

Загрузочные устройства с подвижными плитами колошника для изменения его диаметра при регулировании распределения материалов получили распространение в ФРГ, Франции, Бельгии, Люксембурге. Аналогичная конструкция имеется на печах Японии и России.

Недостатками подвижной брони являются возможность перекоса плит, кольца и крепления в результате термических деформаций кожуха печи, а также недоиспользование объема колошника, необходимого для маневрирования плитами. Плиты делаются из чугуна. Стойкость их около 3 лет. Износ за указанный период по нижнему краю плит составляет ~ 20 мм при общей толщине в 50 мм.

7.2. Бесконусные загрузочные устройства

С увеличением диаметра колошника при увеличении объема доменной печи диаметр большого конуса двухконусного загрузочного аппарата непрерывно возрастает, так как величина зазора между стенкой колошника и кромкой большого конуса должна сохраняться на заданном расчетном уровне. Так, на доменной печи полезным объемом 3200 м³ диаметр большого конуса засыпного аппарата достиг 7 м. Отливка детали такого размера и ее механическая обработка представляют значительную сложность. Кроме того, с увеличением диаметра колошника загрузка материалов аппаратом, состоящим из воронки и конуса, не обеспечивает необходимое распределение материалов в доменной печи – в центр печи не попадает нужное количество рудных материалов.

Наибольшее распространение для печей большого объема получили бесконусные загрузочные устройства (БЗУ) с распределительными устройствами в подкупольном пространстве доменной печи. Бесконусное загрузочное устройство служит для шлюзования и загрузки шихтовых материалов в доменную печь с распределением их по сечению колошника в соответствии с заданной программой.

Работа с БЗУ способствует более равномерному распределению шихты по поверхности засыпи и по объему доменной печи, что в итоге приводит к снижению удельного расхода топлива и увеличению производительности печи. Применение БЗУ позволяет уменьшить расход кокса на 5–7 % в сравнении с конусным загрузочным устройством, увеличить производительность печи на

5–10 %, уменьшить стоимость ремонтных работ на 50 % в течение всего срока эксплуатации.

Идея такой конструкции впервые была предложена еще в XIX в. Впоследствии ее использовала в 1972 г. фирма «Пауль-Вюрт» (Люксембург), которая разработала загрузочное устройство с лотковым распределителем. В настоящее время различные конструкции БЗУ разработаны и предлагаются заводами-изготовителями металлургического оборудования: «Уралмаш», «Азовмаш», «ММК-Гипромез», фирма «Витковице» (Чехия).

Общее для конструкций БЗУ – наличие приемных воронок-бункеров с клапанами, дозирующих шихтовых затворов и распределителей, а также применение гидропривода для клапанных механизмов, затворов и заслонок. Распределители этих засыпных аппаратов обеспечивают расположение гребней загружаемых материалов на любом расстоянии от стенок и оси печи, что отвечает требованиям, предъявляемым к загрузочным устройствам современного доменного производства.

Конструкция с лотковым распределителем фирмы «Пауль-Вюрт» (рис. 7.11) имеет два (иногда три) промежуточных бункера для накопления шихты (для печи 3200 м³ – объемом 50 м³ каждый, для печи 5000–5500 м³ – 75 м³) на весоизмерительных месдозах, обеспечивающих дозирование по массе шихтовых материалов при выгрузке в кольцевые зоны колошника.

Приемная воронка, установленная на катках, поочередно перемещается по рельсам над бункерами шихты, затворы которых при этом автоматически открываются. В бункеры подается пар, и каждый из них имеет по два шлюзовых тарельчатых клапана сверху и снизу: уплотняющие (с силиконовой резиной) и грузовые. Для выравнивания давления в печном пространстве и бункерах в последние подается чистый доменный газ под давлением, равным печному. После разгрузки материалов давление в бункере выравнивается с атмосферным.

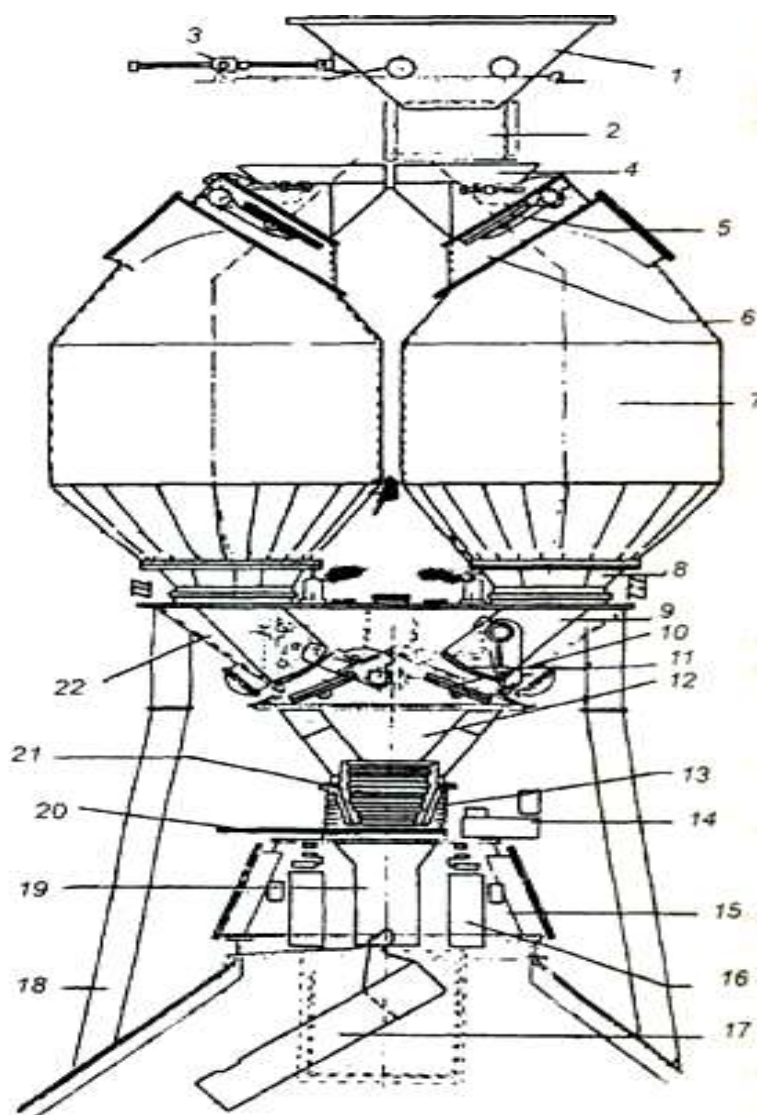


Рис. 7.11. Бесконусное загрузочное устройство:

1 – передвижная приемная воронка; 2, 3 – шихтовый затвор и гидропривод приемной воронки; 4 – раструб; 5, 6 – верхний газоплотнительный клапан и его корпус; 7 – шихтовый бункер; 8 – конический переходный кожух; 9 – восьмигранный направляющий желоб; 10 – нижний газоплотнительный клапан; 11 – шихтовый затвор; 12 – сборная воронка; 13 – волнистый компенсатор; 14 – привод вращения лотка; 15 – корпус редуктора; 16 – привод наклона лотка; 17 – распределительный лоток; 18 – опорные колонны для бункеров и блока клапанов; 19 – спусковой цилиндрический желоб; 20 – листовая задвижка; 21 – износостойкое направляющее шихту устройство; 22 – корпус для уплотнительных клапанов и шихтовых затворов

Шихта из бункеров выгружается в направляющие желоба с отсекающими клапанами (верхним и нижним) со скоростью, определяемой степенью раскрытия шихтового затвора, и через центральную трубу диаметром 700–800 мм, расположенную по оси печи внутри планетарного редуктора привода лотка, по-

падает на вращающийся лоток (длина до 5 м, покрыт жаропрочным износостойким материалом с большим содержанием Ni) и сыпается в печь.

Вращение лотка начинается сразу же после подъема зондов, измеряющих уровень шихты в печи, и начала загрузки одного из шихтовых бункеров и осуществляется с помощью планетарного редуктора и двух электродвигателей переменного и постоянного тока общей мощностью 10 кВт. Приводы лотка размещены рядом с центральной трубой в футерованной камере. Для защиты электрооборудования от воздействия газов и пыли в камеру под давлением (выше примерно на 0,1 атм давления в печи) подается холодный азот или чистый доменный газ. Это обеспечивает работу приводов при температуре до 70 °С. Вращающийся вокруг оси печи лоток может изменять угол своего наклона по заданной программе относительно той же оси. Изменение угла наклона лотка предусматривается по позициям: 16,0°; 26,2°; 31,0°; 34,8°; 38,0°; 40,5°; 42,7°; 44,7°; 46,0°; 43,8°; 54,0–53,0°. Аппарат оснащен системой автоматического управления.

Бесконусным аппаратом обеспечиваются следующие режимы загрузки шихты при свободном выборе угла наклона желоба: кольцевой и спиральный при автоматическом управлении; секторный и точечный при ручном управлении.

Последовательность выполнения операций по загрузке печи следующая: передвижение приемной воронки, загрузка правого (левого) бункера, выравнивание давления в правом (левом) бункере с давлением газа в печи, выгрузка материала с правого (левого) бункера на распределительный лоток, выравнивание давления в правом (левом) бункере с атмосферным.

«Гипромезом» разработан вариант аналогичного устройства с выносом редуктора из печного пространства. Это исключает необходимость охлаждения, упрощает обслуживание аппарата и повышает его работоспособность.

В Японии разработано новое бесконусное загрузочное устройство с установкой стабилизатора на разгрузочном конце лотка (рис. 7.12).

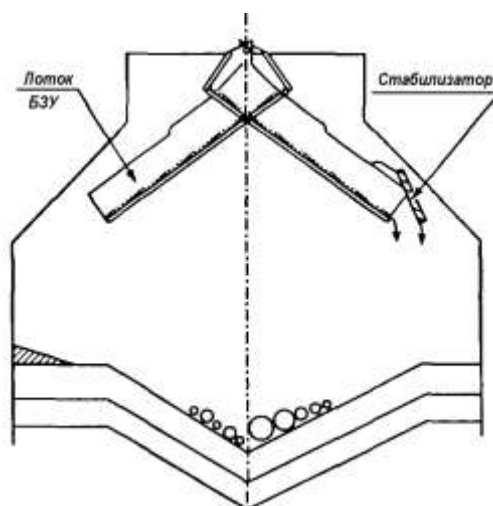


Рис. 7.12. Стабилизатор лотка печи № 6 завода «Чиба» (Япония)

Наличие стабилизатора обеспечивает тонкую регулировку ширины потока шихты за счет изменения траектории падения материалов при их ссыпании с лотка. Новое устройство дает возможность создавать плоский профиль материалов на колошнике. В процессе исследований установлена высокая точность загрузки сырья в заданную зону.

В загрузочном аппарате «ВНИИметмаша-УЗТМ» (рис. 7.13) применяется неподвижная двухскатная направляющая воронка 2 с двумя заслонками 3 над горловинами двух промежуточных бункеров.

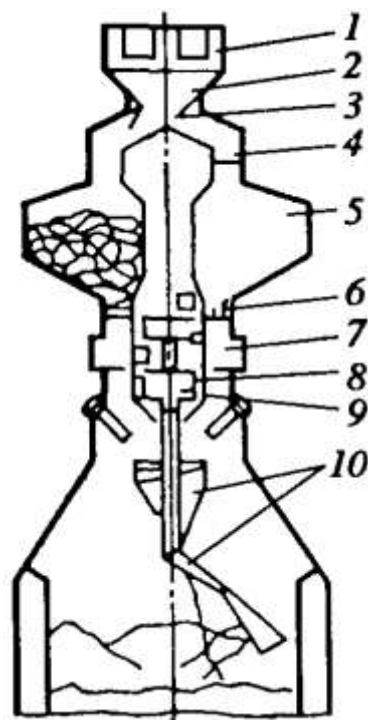


Рис. 7.13. Бесконусное загрузочное устройство «ВНИИметмаша-УЗТМ»:

1 – скип; 2 – приемная воронка; 3 – заслонка приемной воронки; 4 – верхний газоотсекающий клапан; 5 – промежуточный бункер; 6 – шихтовый затвор; 7 – нижний газоотсекающий клапан; 8 – листовая задвижка; 9 – редуктор вращающегося распределителя; 10 – вращающаяся распределительная воронка и склиз

Взвешивание бункеров не предусмотрено. Контроль наличия материалов в них осуществляется изотопными датчиками. В верхней части бункеров установлены уравнительные и предохранительные клапаны. Интенсивность высыпания материалов из бункеров регулируется шихтовыми затворами 6, перекрывающими разгрузочные отверстия. По наклонным течкам материалы подаются во вращающуюся воронку распределителя и далее поступают на выпуклую поверхность распределительного устройства – склиза. Для улучшения окружной равномерности распределения работа воронки предусмотрена с накоплением шихты, уровень которой контролируется изотопным датчиком.

Поверхность склиза представляет собой поверхность конуса с углом наклона образующей к горизонту 40° . Ось конуса совмещается с осью печи и является осью вращения. Максимальный радиус склиза 2,5 м. Он вращается синхронно с воронкой и может поворачиваться относительно ее окна для регулирования радиального распределения шихты. Чем больше радиус склиза напротив окна воронки, тем дальше от центра располагается гребень загруженного материала. Управление распределителем основано на вращении воронки с постоянной скоростью и поддержании заданного углового положения склиза относительно ее путем автоматического регулирования скорости его вращения. Положение вершин гребней изменяется по заданной программе, причем переход с одной позиции на другую производят в функции времени. Особенностью конструкции аппарата является вращение воронки и склиза с помощью двух концентрических штанг. Редуктор привода вынесен за пределы печи.

Наиболее близким аналогом БЗУ «Пауль-Вюрт» является БЗУ фирмы «Витковице» (рис. 7.14), установленное на реконструированной доменной печи № 6 ОАО «ЕВРАЗ-НТМК». Рассмотрим его устройство и принцип действия более подробно. БЗУ фирмы «Витковице» состоит из приемной воронки, арматуры и оборудования выравнивания давления 4, верхних газоплотнительных клапанов 5, шихтовых бункеров (ШБ1 и ШБ2), секторных затворов, нижних газоплотнительных клапанов 6, вращающегося распределителя 7, центральной трубы и лотка (на рисунке не показаны).

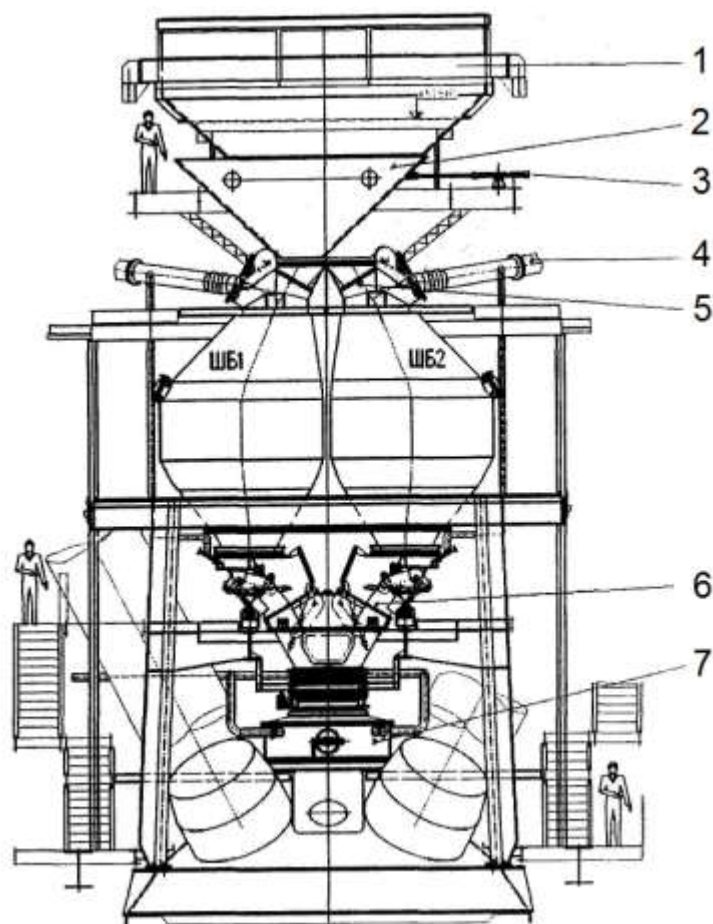


Рис. 7.14. БЗУ доменной печи № 6 ОАО «ЕВРАЗ-НТМК»:

1 – верхняя часть приемной воронки; 2 – нижняя часть приемной воронки; 3 – гидравлический привод воронки; 4 – арматура и оборудование выравнивания давления; 5 – верхние газоплотнительные клапаны; 6 – нижние газоплотнительные клапаны; 7 – вращающийся распределитель; ШБ1, ШБ2 – шихтовые бункеры

Приемная воронка служит для направления потока шихтовых материалов во время опорожнения скипа в левый или правый шихтовый бункер. Вертикально разделена на две части. Верхняя часть приемной воронки 1 с большими плановыми размерами, жестко закрепленная на площадке, принимает шихтовый материал и направляет его в нижнюю часть. Она представляет собой сварной короб, футерованный изнутри износостойкими плитами. Внизу имеет шиберный затвор для предотвращения пыления во время наполнения шихтовых бункеров. Сверху приемная воронка оборудована двумя решетками с размером ячеек 320x320 мм для предотвращения попадания в нее негабаритных материалов. Решетки подвешены цепями на крюках по краям воронки и на поперечной балке.

Нижняя часть приемной воронки 2 перемещается по направляющим рельсам в горизонтальной плоскости с помощью гидравлического привода 3 и служит для направления потока материала в выбранный шихтовый бункер. Она представляет собой сварную конструкцию, футерованную изнутри износостойкими плитами. Внизу имеет фартуки, препятствующие пылевыведению во время наполнения шихтовых бункеров. Воронка оборудована сигнализацией крайних положений и перемещения.

Шихтовые бункеры представляют собой сосуды высокого давления, служащие для приема и накопления шихтовых материалов и предотвращения выделения доменного газа в атмосферу. Форма бункеров рассчитана из условия минимизации неиспользуемого пространства с учетом углов ссыпания материалов. Полезный объем каждого бункера равен двум объемам скипа и составляет 28 м³. Бункеры футерованы изнутри износостойкими плитами, оборудованы радиоизотопными излучателями и датчиками индикации опорожнения.

В нижней части бункеров имеется компенсатор, обеспечивающий ограничение воздействий теплового расширения, изменение зазора для монтажа, перемещение заглушки.

Каждый бункер оборудован верхним и нижним газоплотнительными клапанами и секторным затвором. Секторные затворы предназначены для регулирования скорости опорожнения шихтовых бункеров за счет создания определенной щели для потока шихтовых материалов согласно выбранной программе и для защиты нижних газоплотнительных клапанов. Секторный затвор имеет семь положений, угол открытия его задается для каждого материала с пульта управления печи для обеспечения постоянства времени его истечения.

Газоплотнительные клапаны служат для отделения объемов шихтовых бункеров от атмосферы (верхние) и от печи (нижние), имеют гидравлические приводы. К корпусу нижних газоплотнительных клапанов крепится воронка вращающегося распределителя, футерованная износостойкими плитами и имеющая люк для проведения осмотров.

Вращающийся распределитель является одним из самых важных устройств БЗУ, который одновременным движением лотка в двух перпендикулярных друг к другу плоскостях (опрокидывание и поворот) позволяет укладывать шихтовые материалы на определенное место по поверхности шихты по всему сечению колошника доменной печи. Привод опрокидывания лотка – гидравлический, поворота – электрический.

Лоток предназначен для направления шихтовых материалов из центральной трубы в заранее установленное место на поверхности засыпи, распределения их по окружности и радиусу колошника. Конструкция, конфигурация и футеровка лотка имеют большое значение для траектории движения шихты. Некоторые конструкции лотков БЗУ приведены на рис. 7.15.

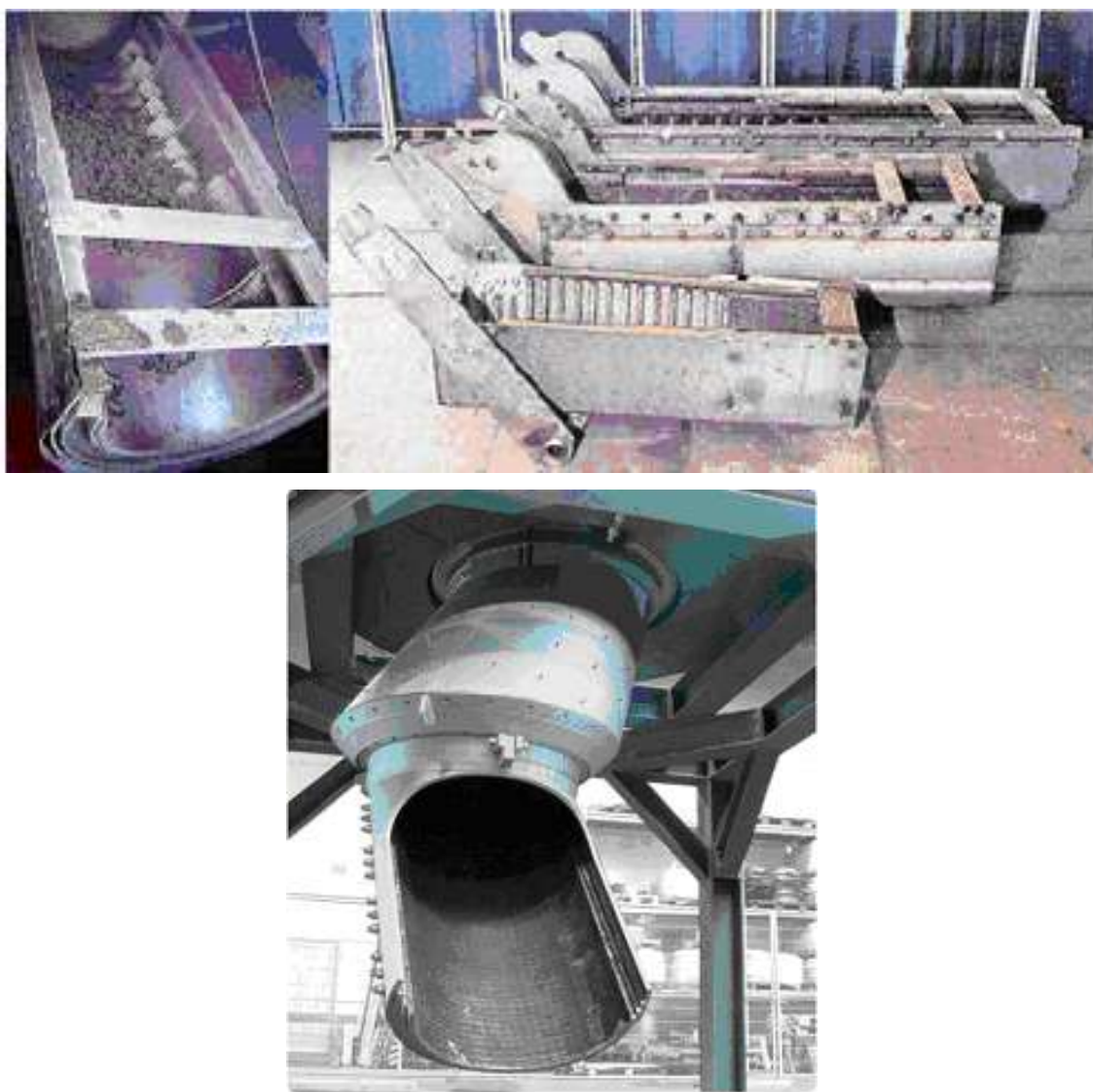


Рис. 7.15. Конструкции лотка БЗУ

Лоток БЗУ «Витковице» представляет собой желоб длиной три метра и состоит из корпуса, футерованного износостойкими литыми плитами типа stonebox, вкладыша и крепежной конструкции. В случае износа плит можно произвести замену либо всего лотка, либо вкладыша.

Конструктивной особенностью БЗУ является расположение трансмиссионного редуктора в рабочем пространстве печи. Температура во вращающемся распределителе должна составлять: рабочая – 40–70 °С, максимальная – не более 80 °С, а температура колошникового газа не должна превышать 350 °С.

Охлаждение вращающегося распределителя БЗУ фирмы «Витковице» осуществляется азотом. Для предотвращения перегрева распределителя и выхода его из строя в случае понижения давления азота ниже 0,22 МПа (2,2 кгс/см²), либо прекращения его подачи, либо увеличения объемной доли кислорода в азоте от 3,5 до 4,5 % более чем на 20 мин или сверх 4,5 % независимо от времени систему охлаждения следует перевести на снабжение природным газом с избыточным давлением 0,2 МПа (2 кгс/см²). Для охлаждения конструкции БЗУ фирмы «Пауль-Вюрт» (фланец, затворы, клапаны, редуктор), установленного на ДП № 5 ОАО «ЕВРАЗ-НТМК», используется замкнутая двухконтурная система водяного охлаждения. При отказе системы водяного охлаждения предусмотрена подача на охлаждение чистого азота. При отсутствии охлаждения редуктора доменную печь необходимо остановить.

Для контроля положения материала и управления системой загрузки БЗУ оборудовано радиоизотопными датчиками индикации наличия материалов в шихтовых бункерах (установлены над секторными затворами) и индикации потока материалов (установлены под нижними газоплотнительными клапанами).

Таблица 7.1

**Технические характеристики и параметры работы БЗУ
доменной печи № 6 ОАО «ЕВРАЗ-НТМК» [12]**

№ п/п	Параметр, размерность	Величина
1	Полезный объем печи, м ³	2200
2	Диаметр горна/колошника, м	9,7/7,1
3	Проектная суточная производительность печи, т *	4500
4	Внутренние размеры приемной воронки на входе, мм	3510x7176
5	Длина и ширина эллиптического отверстия на выходе нижней части приемной воронки, мм	764x940
6	Длина хода нижней части приемной воронки, мм	1070
7	Полезный объем скипа, м ³	14
8	Полезный объем шихтового бункера, м ³	28
9	Количество шихтовых бункеров	2
10	Время загрузки одного скипа в шихтовый бункер, с	52,5
11	Время загрузки одной порции (2 скипа) в шихтовый бункер, с	150
12	Расход шихты в печь, м ³ /с: рекомендуемый максимальный	0,3 0,7
13	Число положений секторного затвора	7
14	Нижний предел времени выгрузки при величине порции 28 м ³ и расходе шихты 0,7 м ³ /с, с	40
15	Давление газа на колошнике, МПа, не более **	0,25
16	Температура газа на колошнике, °С: проектная, не более повышенная (в течение 1 часа 2 раза в месяц) максимальная (в течение 5 мин 5 раз в год)	350 500 900
17	Температура во вращающемся распределителе, °С: рабочая максимальная	40–70 80
18	Основная среда для охлаждения	Азот
19	Альтернативная среда для охлаждения	Природный газ
20	Выравнивание давления 1-й ступени	Очищенный колошниковый газ
21	Выравнивание давления 2-й ступени: основная среда альтернативная среда	Азот Природный газ
22	Среда для инертизации	Пар
23	Среда для привода пневматически управляемых арматур	Азот
24	Диаметр центральной трубы, мм	600
25	Скорость 1-го вращения лотка, об/мин	8
26	Скорость 2-го вращения лотка, об/мин	4
27	Скорость опрокидывания лотка, град/с	4
28	Диапазон изменения угла наклона лотка, град к горизонту: в рабочем режиме конструктивный	33,5–84,0 0–90,0
29	Оптимальный уровень засыпи, м	0,5–0,7

* Достигнутая производительность 7300–7500 т/сут.

** После реконструкции.

Загрузка печи с помощью БЗУ осуществляется отдельными подачами, тип которых характеризуется числом и весом коксовых и железорудных скипов, а также порядком их загрузки в печь. Кокс и железорудные материалы с добавками грузятся в печь раздельно, совместная загрузка их в один бункер не допускается. Подача – это совокупность двух смежных порций, одна из которых кокс, а другая – железорудные материалы с добавками. Объем порции любого материала не должен превышать полезный объем шихтового бункера (для печи № 6 «ЕВРАЗ-НТМК» 28 м³).

Материал из системы шихтоподачи в скипы начинает поступать при открывании секторного затвора того бункера, который предусмотрен для новой загрузки. Когда начало полупорции (количество шихты, равное объему скипа) попадает в скип, на колошник выдается команда подготовить заранее выбранный бункер к приему шихты. К этому времени выгрузка шихты из бункера закончена, а давление может быть уменьшено до атмосферного. Набранные шихтовые материалы скипами доставляются в приемную воронку, которая направляет их в выбранный бункер.

Ход первого скипа с коксом или первого скипа с рудой к колошнику разрешен лишь тогда, когда хотя бы один шихтовый бункер БЗУ пуст.

При поступлении команды от закрытого нижнего газоплотнительного клапана открывается атмосферный выпускной клапан. После уменьшения давления в бункере до атмосферного открывается верхний газоплотнительный клапан, а атмосферный выпускной клапан закрывается. Затем открывается шихтовый затвор приемной воронки, и бункер готов к приему шихты.

После опорожнения скипа в первый шихтовый бункер через определенное время закрывается заслонка верхней части приемной воронки, и нижняя часть воронки перемещается ко второму бункеру.

Одновременно с этим закрывается верхний газоплотнительный клапан первого бункера. Затем давление в нем доводится до давления колошникового газа в печи. Для этого вначале открывается наполнительный клапан и получистый газ через обратный клапан поступает в бункер (выравнивание давления

первой ступени). Затем наполнительный клапан закрывается, а впускной (подача азота) открывается и производится окончательное выравнивание давления в бункере по давлению колошниковых газов в печи (выравнивание давления второй ступени). В качестве альтернативной среды для выравнивания давления второй ступени может использоваться природный газ с температурой 30 °С с расходом в зависимости от объема недоотпуска азота. При достижении требуемого давления команда на закрытие клапана подачи азота выдается реле давления между бункером и газоотводящими трубами или конечным выключателем на обратном клапане между бункером и газоотводящей трубой.

Команда на загрузку шихты в доменную печь выдается радиолокационными датчиками при достижении фактического уровня засыпи заданной величины.

После этого открывается нижний газоплотнительный клапан, затем – секторный затвор в требуемое положение. Одновременно открывается клапан подачи азота для продувки и подавления пыли в бункере и подается команда на набор новой полупорции в скип.

Шихта из бункера через центральную трубу потоком направляется на лоток. Перед поступлением материала на лоток последний уже находится в заданном угле наклона и начинает вращаться. Опорожнение бункера считается законченным, когда датчик, расположенный под нижним газоплотнительным клапаном, даст сигнал о конце потока шихты, при условии, что нет индикации наличия материала в шихтовом бункере. После этого секторный затвор сначала полностью открывается, затем закрывается. Далее закрываются клапаны подачи азота и нижний газоплотнительный.

Лоток после сигнала «бункер пуст» принимает заданный угол наклона для выгрузки следующей порции шихты.

Правильное распределение материалов на колошнике доменной печи может быть обеспечено только в том случае, если приемная воронка, шихтовые бункеры, лоток, а также газоотводы, купол и футеровочные плиты колошника исправны и чисты от налипаний.

Лоток БЗУ может изменять угол наклона от 6 до $56,5^\circ$ в 10 угловых положениях в автоматическом и дистанционном режимах работы. За 0° принято вертикальное положение лотка.

Распределительный лоток при работе в автоматическом режиме вращается постоянно. Для повышения равномерности окружного распределения материалов открытие секторного затвора при выгрузке каждой подачи (двух смежных порций кокса и железорудных материалов) производится со смещением начала сыпи по отношению к предшествующему на 135° . В целях равномерного износа футеровочных плит лотка после загрузки в печь восьми подач меняется направление его вращения. Для равномерного износа футеровочных плит шихтовых бункеров после загрузки каждых шестнадцати подач меняется вид загружаемого в бункер материала, т. е. коксовый бункер наполняется рудой, и наоборот.

Время выгрузки для всех видов материалов из шихтовых бункеров должно быть постоянным. Это обеспечивается выбором угла раскрытия секторного затвора для материалов с различными гранулометрическими свойствами. Угол раскрытия секторных затворов для каждого вида материала устанавливается вручную задатчиком на щите ПУ. Общее время поступления шихты в печь задается заранее и зависит от темпа загрузки. Секторный затвор имеет семь цифровых задатчиков хода, устанавливаемых для каждого вида материала (агломерат КГОК, агломерат ВГОК, окатыши, известняк, металлодобавки, флюсующие добавки, кокс) так, чтобы время истечения его из бункера было одинаковым. При этом учитывается, что при многокольцевой загрузке увеличение времени выпуска материала способствует более равномерному его распределению на колошнике.

Лоток БЗУ позволяет распределять шихтовые материалы в четырех режимах (рис. 7.16): кольцевом, многокольцевом (спиральном), секторном и точечном.



Рис. 7.16. Режимы загрузки БЗУ [12]

Основной режим загрузки – спиральный, остальные применяются кратковременно при существенных отклонениях распределения газового потока от оптимального (канальный ход, односторонний ход и т. д.). При работе в режиме кольцевой загрузки лоток работает в одном заданном программой угловом положении. Допускается в случае необходимости загрузка в кольцевом режиме одной порции железорудных материалов и двух порций кокса в цикле. Сечение печи на уровне технологического «О» разделено на 8 (10) круговых колец. Количество рабочих круговых колец определено в процессе работы печи после измерения фактических мест падения шихты.

Управление кольцевой загрузкой осуществляется как в автоматическом, так и в дистанционном режиме.

При спиральной загрузке материал распределяется по окружности и сечению колошника с применением двух и более угловых положений вращающегося лотка. Выгружаемая порция разбивается на равные по массе части, число которых соответствует заданному числу угловых положений лотка; каждая часть разгружается в одном из угловых положений. Выбранная продолжитель-

ность выгрузки материала на поверхность засыпи делится логическим устройством на интервалы в соответствии с заданным по программе количеством угловых положений. Переход в очередное угловое положение лоток осуществляет по истечении установленного интервала времени.

Такая загрузка осуществляется только в автоматическом режиме [12].

Пример 1. Программой задан интервал угловых положений 8-4 для распределения железорудной порции массой 50 т. Это значит, что материал должен быть распределен в печи на пяти угловых положениях. При этом логическое дозирующее устройство производит деление массы материала на заданное по программе количество угловых положений лотка (в примере 5 положений). Таким образом, после выгрузки $50 : 5 = 10$ т из восьмого углового положения лоток переходит в следующее по программе угловое положение 7, после выгрузки следующих 10 т – в положение 6, после выгрузки еще 10 т – в положение 5, и так до полной выгрузки материала из бункера из положения 4.

Пример 2. Для выгрузки из шихтового бункера 50 т материала выбрано рациональное время 90 с при заданной программе работы лотка в интервале угловых положений 8-4 (5 положений). В этом случае переход лотка в очередное положение будет осуществляться через каждые $90 : 5 = 18$ с.

Секторная загрузка обеспечивает распределение материала в определенном секторе колошника за счет перемещения вращающегося лотка в границах этого сектора. Сечение печи на уровне технологического «О» разделено на 8 секторов. При секторной загрузке материалы распределяются в пределах любого из восьми секторов, оси которых расположены, начиная от прямой, соединяющей ось печи с отметкой 0° , и далее через 45° . Величина сектора определяется установленной с помощью специального задатчика амплитудой по времени хода лотка вправо и влево от выбранной оси.

Управление БЗУ при таком виде загрузки осуществляется в дистанционном режиме. Загрузка материалов в сектор может быть прервана без остановки лотка путем переключения на кольцевой режим.

Точечная загрузка осуществляется при неподвижном лотке, направляющем поток материала в заданный ограниченный район колошника. Такой режим устанавливается дистанционно с пульта управления БЗУ на главном пульте управления печи.

Управление всеми механизмами системы набора, взвешивания, транспортирования шихтовых материалов к БЗУ и загрузки их в доменную печь осуществляется автоматически по заданной программе в определенной последовательности. Дистанционное управление предусмотрено для ликвидации сбоев при работе в автоматическом режиме.

Техническое обслуживание БЗУ производится в соответствии с технологической инструкцией. Профилактическое обслуживание механизмов шихтоподачи и БЗУ производится по графику, утвержденному начальником доменного цеха. Кроме того, при остановках печи комиссией проверяется наличие лотка и степень его износа путем внешнего осмотра через открытые люки с зажиганием газа. Результаты осмотров записываются в специальном журнале. Контроль над работой системы загрузки осуществляет мастер печи.

7.3. Роторное загрузочное устройство

В 1989 г. в России было разработано новое роторное загрузочное устройство (РЗУ) (рис. 7.17).

В состав РЗУ входят верхний и нижний конусы, пятилопастный ротор и его привод, приемная и направляющая воронки, промежуточный бункер с корректирующим кольцом, система охлаждения и смазки и автоматизированная система управления [13].

РЗУ устанавливается на колошниковый фланец и не требует реконструкции наклонного моста и купольной части доменной печи. Лопasti ротора состоят из приемной самофутерующейся и загрузочной части. Загрузочная часть ротора распределяет материалы по поверхности колошника, она защищена плитами из износостойкого чугуна. Подгрузка сырья в заданный сектор колошника

осуществляется за счет подвижного корректирующего кольца, расположенного в основании промежуточного бункера и изменяющего свое положение относительно нижнего конуса.

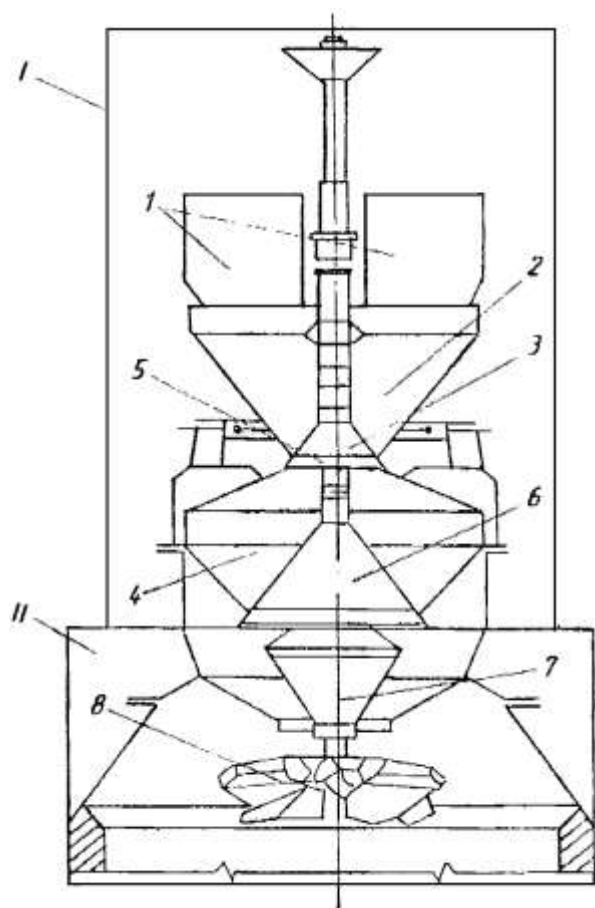


Рис. 7.17. Роторное загрузочное устройство:

I, II – верхний и нижний монтажный узлы; 1 – приемные бункеры; 2 – вращающийся распределитель шихты; 3 – верхний конус; 4 – промежуточный бункер; 5 – контактное кольцо; 6 – нижний конус; 7 – редуктор; 8 – роторный распределитель

Для охлаждения внутренней полости вала ротора и камеры редуктора используется азот в количестве $1000\text{--}1500 \text{ м}^3/\text{ч}$ при давлении $0,5 \text{ МПа}$.

Роторное устройство направляет в печь сырье пятью широкими потоками и с меньшей высоты. Это сокращает сегрегацию материалов на поверхности засыпи и исключает деформацию нижележащих слоев шихты за счет осуществления «мягкой» веерообразной загрузки материалов на колошник.

Управление работой ротора и корректирующего кольца производится с помощью АСУ «РОТОР» с использованием следующих режимов загрузки шихты:

- кольцевая загрузка (в заданный радиус при постоянной скорости вращения ротора);

– многокольцевая загрузка (в смежные кольцевые зоны со ступенчатым изменением скорости ротора);

– спиральная загрузка (в смежные кольцевые зоны с непрерывным изменением скорости ротора).

При аварийной остановке ротора материалы ссыпаются по неподвижным лопастям, образуя на колошнике 5 конусообразных холмов. При этом печь может работать без остановки, не прекращая загрузку в течение нескольких часов, без серьезных отклонений от нормального хода.

В табл. 7.2 приведены основные характеристики РЗУ для доменных печей различного объема (1000–3000 м³). Диаметр ротора составляет 3100–4500 мм при скорости вращения его до 20 об/мин и давлении газа на колошнике до 0,28 МПа (изб.). Масса РЗУ изменяется от 125 до 280 т.

Таблица 7.2

Основные технические параметры роторного загрузочного устройства (РЗУ) для доменных печей различного объема

Параметр	Объем доменной печи, м ³		
	1000	2000	3000
Минимальная пропускная способность скипов в час	50	50	50
Полезная емкость приемной воронки, м ³	6,5	12	17
Диаметр верхнего конуса, мм	1650	1650	2500
Диаметр нижнего конуса, мм	3000	3000	4000
Полезная емкость промежуточного бункера, м ³	19,5	36	51
Высота устройства (от уровня колошникового фланца до верха направляющих воронок), м	10,1	11,4	13,0
Диаметр колошника печи, мм	5800	7300	8600
Диаметр ротора, мм	3100	4150	4500
Скорость вращения ротора, об/мин	0–20	0–20	0–20
Мощность электропривода, кВт	25	40	47
Давление газа под колошником, МПа (изб.)	0,25	0,25	0,28
Параметры азота, охлаждающего ротор устройства: расход, нм ³ /ч давление, МПа (изб.)	1000 0,5	1300 0,5	1500 0,5
Масса РЗУ, т	125	195	280

В конструкцию БРЗУ фирмы «ТОТЕМ» (рис. 7.18, 7.19) внесены принципиальные изменения по сравнению с первоначальной конструкцией, разработанной Западно-Сибирским металлургическим комбинатом, показанной на рис. 7.17.

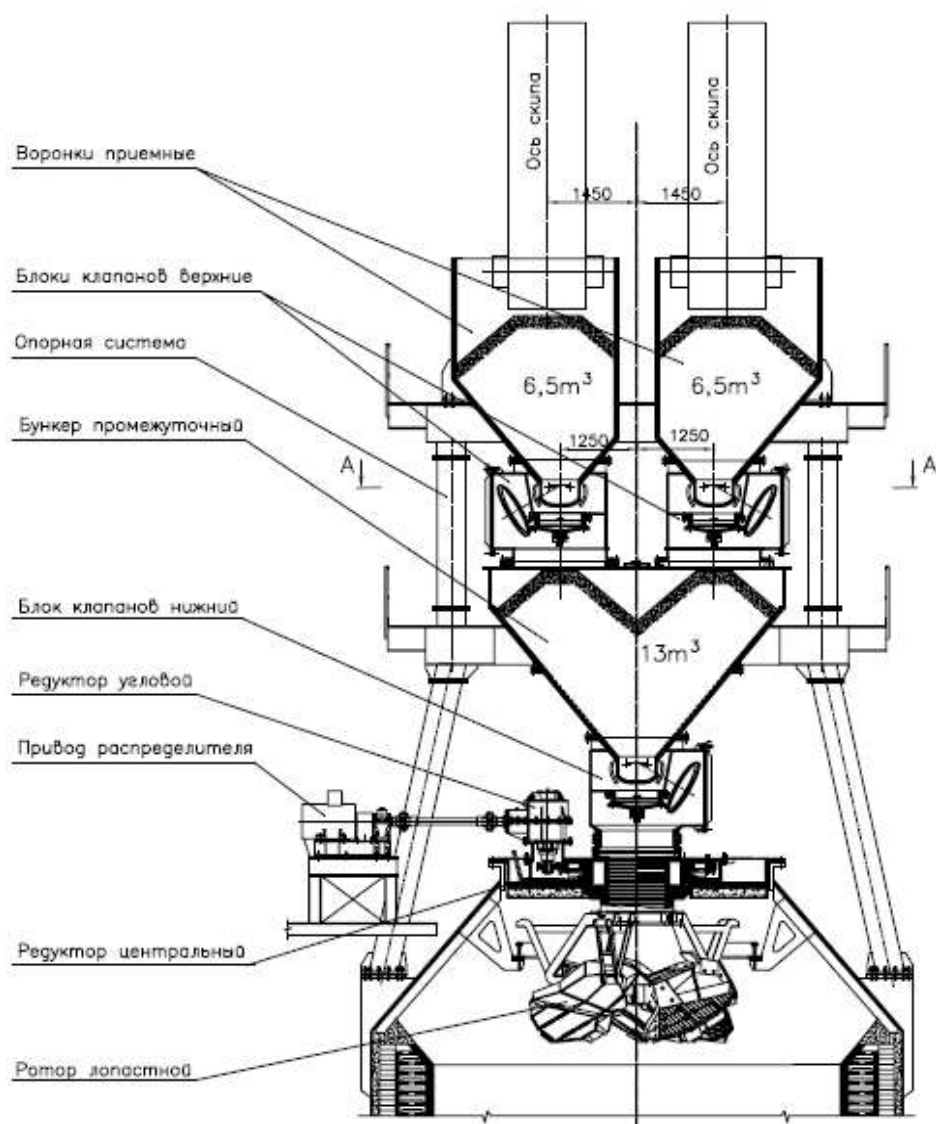


Рис. 7.18. Бесконусное роторное загрузочное устройство (БРЗУ) для доменной печи №2 ОАО «НЛМК» (проект, вид со стороны оси наклонного моста)

Исключены двухконусная газоплотнительная система и вращающийся распределитель шихты. Вместо этого приемные воронки и промежуточный бункер оснащены газоплотнительными клапанами. Вместе с тем конструкция БРЗУ «ТОТЕМ» существенно проще БЗУ «Пауль Вюрт». Внешний вид БРЗУ и ее элементов показаны на рис. 7.20–7.22.

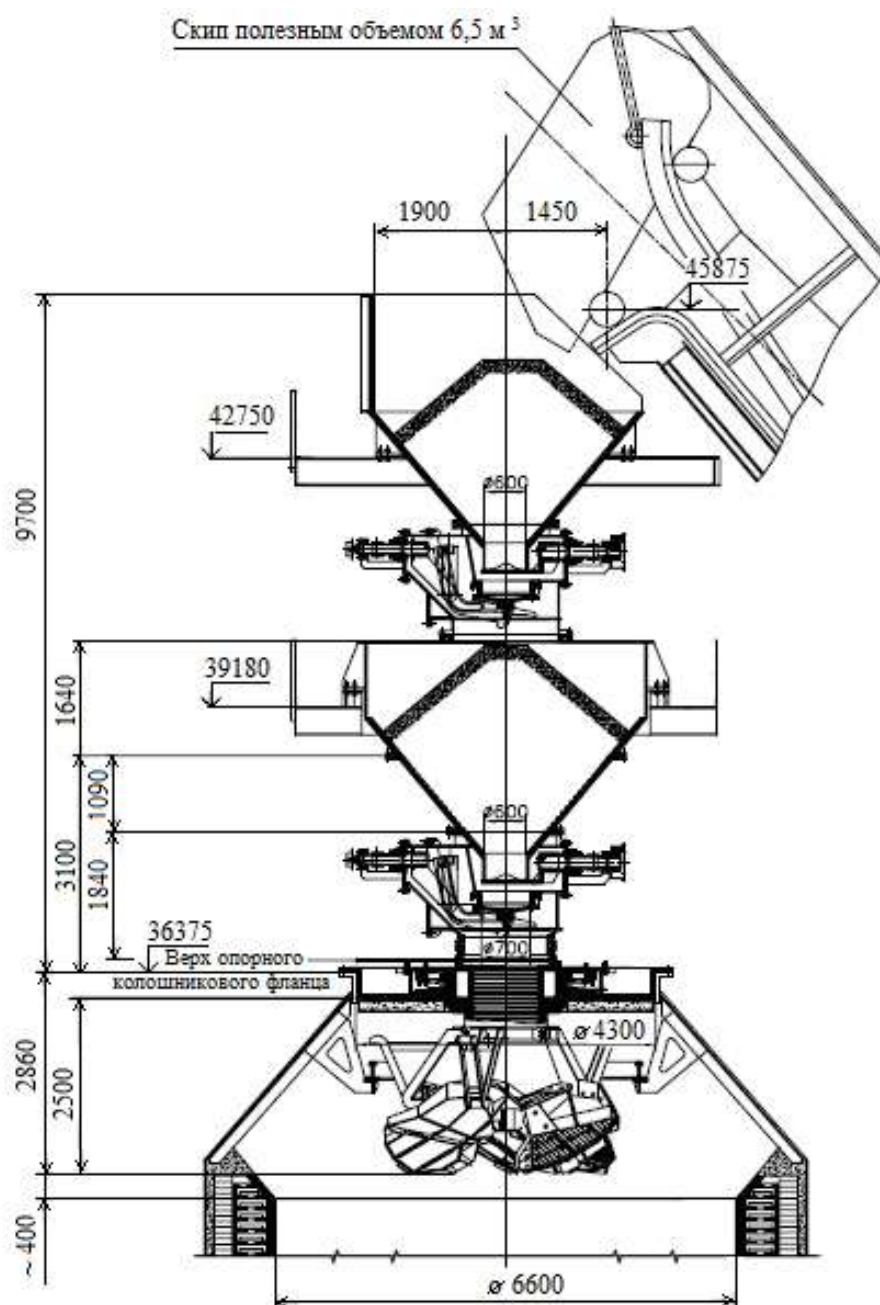


Рис. 7.19. Бесконусное роторное загрузочное устройство (БРЗУ) для доменной печи №2 ОАО «НЛМК» (проект, вид со стороны воздухонагревателей)

Технологические преимущества загрузки доменных печей роторным загрузочным устройством фирмы «ТОТЕМ» в сравнении с аппаратом лоткового типа фирмы «Пауль Вюрт» (ПВ) заключаются в следующем [14]. БРЗУ способно усреднять загружаемую порцию материалов по химическому и гранулометрическому составу. Усреднение достигается благодаря многослойной загрузке. При этом исключается образование каналов и перекосов уровня шихты, повышается степень использования восстановительной способности газа в доменной

печи. Гибкое управление радиальным распределением материалов в доменной печи позволяет оптимизировать рудные нагрузки на кокс по радиусу печи, что способствует минимизации расхода кокса. При загрузке с помощью БРЗУ не разрушается профиль предыдущей порции шихты, что позволяет улучшить контроль за распределением шихтовых материалов. Мягкая загрузка с небольшой высоты предотвращает образование переуплотненных объемов шихты, ухудшающих газопроницаемость.



Рис. 7.20. Монтаж БРЗУ ДП № 2 завода фирмы «Джиндал» в Райгархе (Индия)



Рис. 7.21. Ротор БРЗУ в сборе



Рис. 7.22. Сборка центрального редуктора (завод Vander Ploeg, Голландия)

Высокий темп загрузки доменной печи по сравнению с однотоковым устройством фирмы «Пауль Вюрт» достигается за счет того, что выгрузка материалов производится интенсивно при полном открытии шихтовых затворов.

При этом обеспечивается высокая равномерность окружного распределения материалов.

Длительная (более 7 лет) эксплуатация роторного загрузочного устройства на ДП № 3 Бхилайского металлургического завода (БМЗ) показала, что его применение в сравнении с аппаратом фирмы «Пауль Вюрт» (ДП № 4–ДП № 7) обеспечивает более низкий расход кокса (не менее чем на 5 %) и более высокую производительность доменной печи (минимум на 6–8 %). Эти результаты получены на основе анализа данных официальных годовых отчетов «БМЗ» и представлены ниже в виде столбчатых диаграмм (рис. 7.23).

В табл. 7.3 представлены показатели работы ДП № 2 завода JSPB (с БРЗУ) в сопоставлении с показателями работы ДП № 6 завода компании Tata Steel (с БЗУ), имеющей лучшие показатели работы в Индии в 2007 г. Приведенный к сопоставимым условиям суммарный расход топлива на ДП № 2 в феврале–марте 2009 г. (526, 543 и 523 кт/т соответственно) был ниже на 3,0–6,5 %, а удельная производительность выше на 12,5–18,5 %.

*Конструктивные преимущества БРЗУ в сравнении с аппаратом
«Пауль Вюрт» (ПВ)*

1. Бóльший срок службы ротора в сравнении с лотком. За время многолетней эксплуатации роторов на ЗСМК и БМЗ ни один из них не вышел из строя. Производилась только частичная замена защитных плит. На БМЗ ротор эксплуатировался непрерывно в течение 11 лет.

2. Простая конструкция центрального редуктора БРЗУ. Центральный редуктор БРЗУ состоит всего из одной цилиндрической зубчатой пары, осуществляющей только вращательное движение ротора. Центральный редуктор аппарата ПВ имеет сложную планетарную конструкцию, в его состав дополнительно входят два червячных редуктора и система водяного охлаждения.

3. Малый износ шихтовых затворов БРЗУ. В связи с отсутствием необходимости регулировать скорость выхода шихты на ротор износ створок шихтовых затворов практически отсутствует.

4. Меньшее количество механизмов. В БРЗУ используется два шихтовых затвора и два газоплотнительных клапана. В двухтрактовом аппарате ПВ имеется два шихтовых затвора, четыре газоплотнительных клапана и перекидной ЛОТОК.

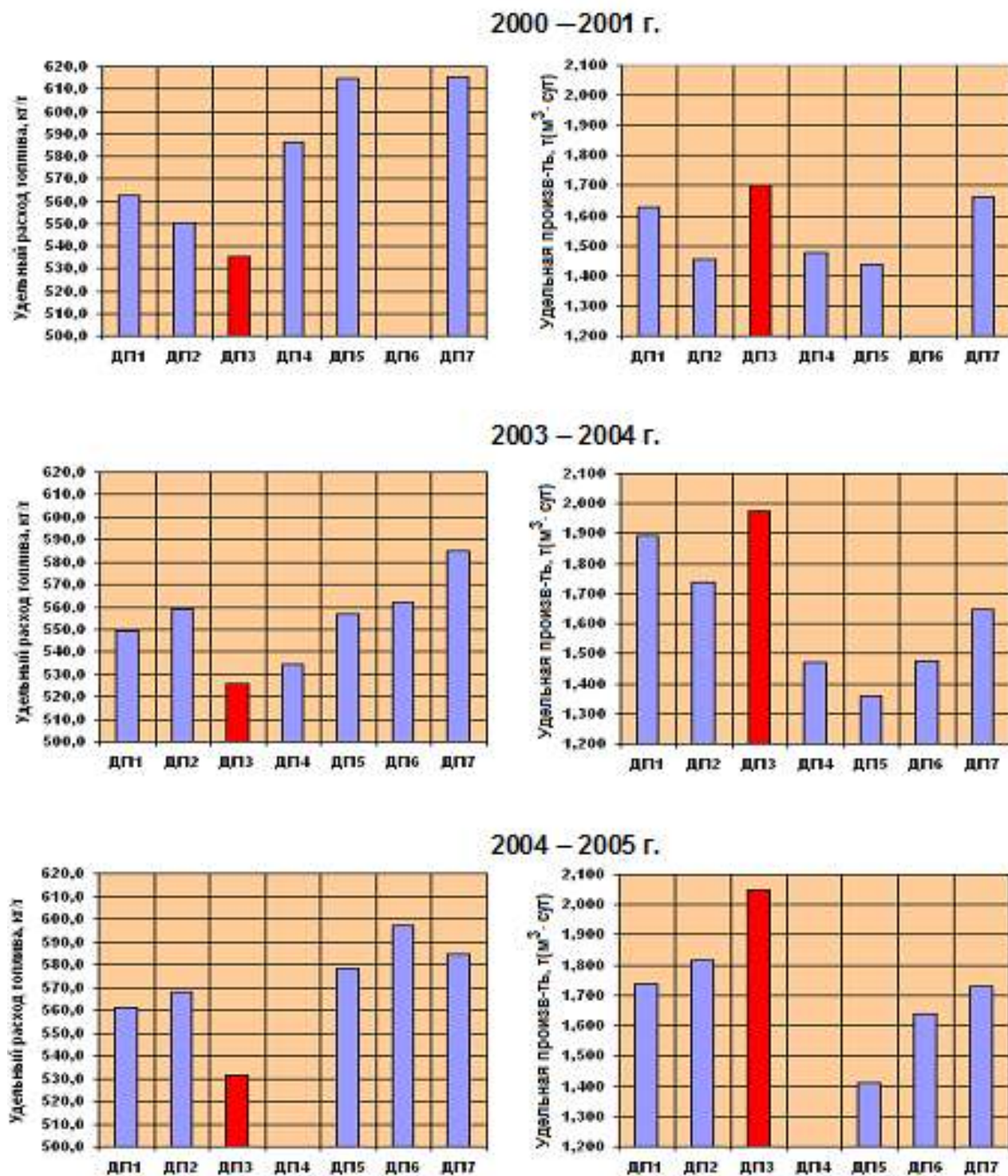


Рис. 7.23. Сопоставление приведенных среднегодовых показателей работы доменных печей Бхилайского метзавода [14]

Таблица 7.3

Сравнение показателей работы ДП-2 (с БРЗУ) завода JSPL
и ДП-6 завода Tata Steel [15]

Показатели	Tata Steel, БЗУ	JSPL, БРЗУ			
	Период работы печи				
	май 2007 г.	февраль 2009 г.	март 2009 г.	апрель 2009 г.	
Производство чугуна, т/сут	5476	3702,9	3667	3617,5	
Удельная производительность, т/(м ² ·сут)	57,13	66,85	66,2	65,3	
Удельная производительность, т/(м ³ ·сут)	2,38	2,55	2,53	2,49	
Простои печи, %	н.д.	2,57	3,26	2,94	
Расход, кг/т:					
кокс	419	407,3	399,8	382,2	
ПУТ	141	124	131,8	142,6	
топливо (суммарный)	560	531,3	531,6	524,8	
руда	502	543	590	520	
агломерат	1042	1094	1060	1130	
кварцит	13	15	5,2	16,76	
Содержание Fe в шихте, %	58,97	57,54	58,46	57,47	
Выход шлака, кг/т	263	312	289,5	311	
Давление в колошнике, бар	1,54	0,95	0,89	0,87	
Перепад давлений, бар	1,63	1,59	1,75	1,76	
Температура колошника, °C	н.д.	79	104	110	
Степень использования CO, %	44,36	45,37	46,08	45,97	
Дутье:					
содержание O ₂ , %	25,35	24,63	24,63	24,71	
температура, °C	1136	1199	1195	1187	
влажность, г/м ³	31	37,8	34,8	41,3	
Содержание в чугуне, %:					
Si	0,8	0,62	0,53	0,52	
Mn	0,054	0,04	0,04	0,04	
S	0,057	0,04	0,04	0,04	
Содержание в шлаке, %:					
Al ₂ O ₃	18,75	19,86	20,48	20	
MgO	6,62	9,3	9,12	9	
Основность шлака CaO:SiO ₂	0,99	1,00	1,02	0,99	
Содержание Fe, %:					
в руде	63,59	64,72	64,76	64,59	
в агломерате	57,66	55,03	55,27	55,06	
Содержание золы в коксе, %	13,72	12,98	12,45	12,38	
Горячая прочность кокса CSR, %	65,01	64,72	64,57	64,6	
Истираемость кокса M ₁₀ , %	5,2	5,61	5,52	5,43	
Содержание золы в ПУТ, %	10,40	9,3	9,83	9,73	
Суммарный расход топлива, кг/т*	560	526	543	523	
Удельная производительность, т/(м²·сут)*	57,13	72,62	73,5	70,0	
Удельная производительность, т/(м³·сут)*	2,38	2,77	2,81	2,67	

* Приведенные к сопоставимым условиям.

5. Отсутствие системы взвешивания. В БРЗУ нет необходимости взвешивания промежуточного бункера. Это существенно упрощает конструкцию загрузочного устройства и систему автоматического управления процессом загрузки, что повышает надежность аппарата в целом.

6. Центральный поток шихты. В БРЗУ реализовано движение шихты по одному сквозному тракту, расположенному по оси устройства, без изменения направления от выгрузки с конвейера до ротора. Это способствует равномерному окружному распределению материалов за счет симметричной выгрузки в печь, а также уменьшает износ оборудования. В двухтрактовом аппарате ПВ материал вначале направляется от центра к периферии с помощью перекидного лотка под конвейером, а затем обратно к центру через нижний блок клапанов, вызывая односторонний износ оборудования и эллипсоидную, несимметричную укладку шихты.

7. Компактная конструкция БРЗУ в силу своих конструктивных особенностей имеет меньшую высоту по сравнению с аппаратами ПВ. Это позволяет осуществлять его установку на действующих доменных печах взамен существующих загрузочных устройств без изменения основных конструкций колошниково-го устройства и верхней части наклонного моста.

Загрузочные устройства с роторным распределением шихты в настоящее время работают на шести доменных печах полезным объемом 1000 м³ ((Бхилаи, Индия), 1681 м³ (JSPL ISW корпорации Jindal, Индия), 2000 и 3000 м³ (ДП № 1–3 ЗСМК, Россия).

8. УСТРОЙСТВА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЗА УРОВНЕМ ШИХТЫ В ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

Правильное распределение материалов и газов в доменной печи может быть получено только при соблюдении постоянства уровня засыпи в печи.

Постоянство уровня шихты важно не только потому, что ее колебания приводят к нарушению в распределении материалов и газов в печи, но еще и потому, что понижение уровня шихты в печи сопровождается повышением температуры колошникового газа и опасности коробления деталей засыпного устройства. Напротив, повышение уровня шихты в печи создает опасность опускания конуса на слой материалов, к поломке деталей засыпного устройства, к изгибу штанги большого и малого конусов.

Контроль за уровнем засыпи чаще всего осуществляется цепными зондами (рис. 8.1).

Цепной зонд представляет собой груз 3 массой 0,5 т, подвешенный на цепи 2, который закрепляется на барабане 1. Барабан помещен в кожух, который соединен с печным пространством. На одном валу с цепным барабаном насажен (за пределами кожуха) другой барабан для каната, идущего на зондовую лебедку. Когда на цепной барабан наматывается цепь (при подъеме зонда), канат сматывается со второго барабана.

Канат соединяется с зондовой лебедкой. Двигатель лебедки все время находится под напряжением и создает момент, направленный на подъем груза. После загрузки шихты в доменную печь, когда нужно опустить груз на шихту, напряжение, подаваемое на двигатель лебедки, уменьшается. Лебедка в этом случае не может удержать груз, он опускается на шихту и движется вместе с ней. Момент, создаваемый лебедкой, в данном случае направлен на подъем груза, но он недостаточен для этого. Однако развиваемый двигателем момент поддерживает канат в натянутом состоянии, что очень важно для поддержания прямо пропорциональной зависимости между положением груза в печи и углом

поворота барабана лебедки. Такая зависимость отсутствует при появлении «слабины каната».

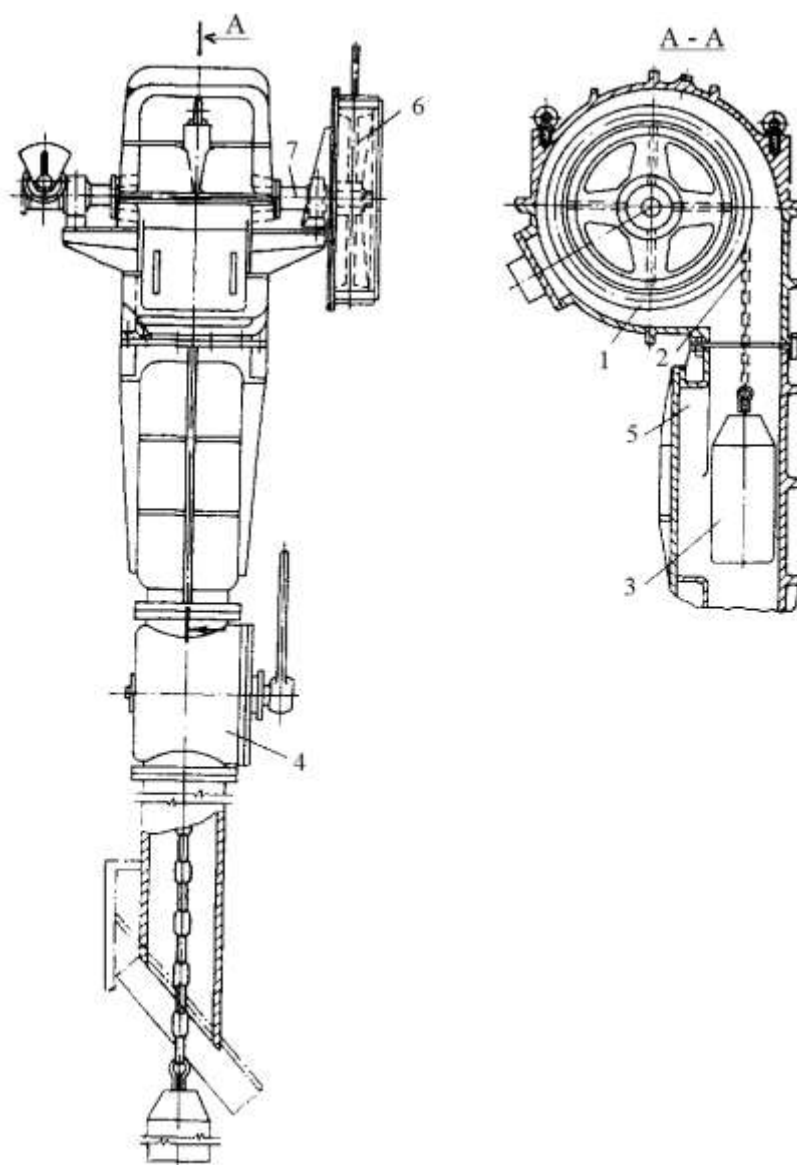


Рис. 8.1. Цепной зонд:

1 – барабан; 2 – цепь; 3 – груз; 4 – пробковый кран; 5 – люк;
6 – барабан для каната; 7 – ось

Перед загрузкой очередной подачи в печь, т. е. перед открытием большого конуса, напряжение, подаваемое на двигатель зондовой лебедки, увеличивается до максимального значения, момент, развиваемый двигателем, увеличивается, и груз поднимается в верхнее положение – на 250 мм выше кромки большого конуса в опущенном состоянии. Тем самым исключается засыпание зонда шихтой и его истирание материалами.

Угол поворота барабана лебедки с помощью установленного датчика передается на регистрирующий прибор. На диаграммной бумаге (круговой или прямоугольной) регистрируется движение груза (зонда) с получением шомпольных (зондовых) диаграмм. Вид шомпольной диаграммы приведен на рис. 8.2. Начальный участок диаграммы указывает на ровный сход шихтовых материалов, а на втором участке видны подстои шихты, с последующими обрывами. Это свидетельствует о нарушении ровного хода плавки.

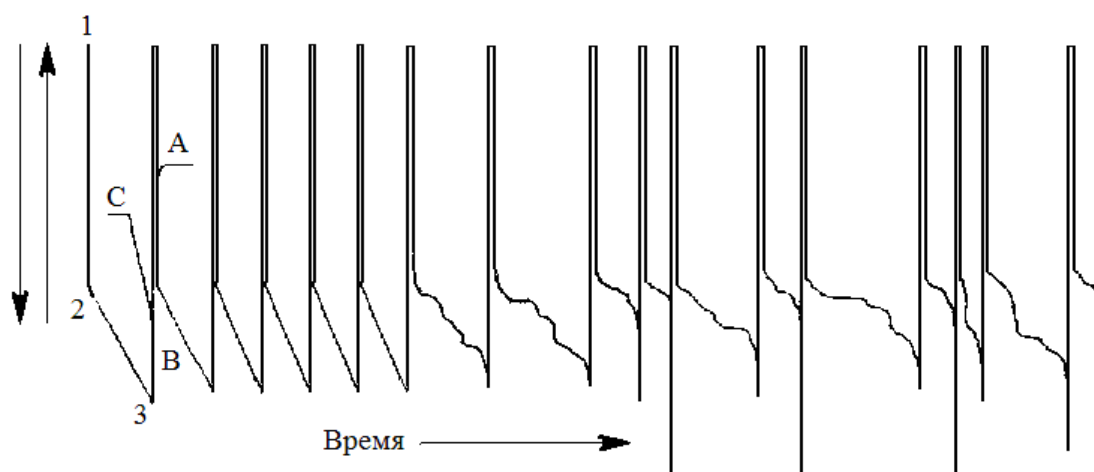


Рис. 8.2. Вид шомпольной (зондовой) диаграммы:

А – момент опускания груза на шихту; В – движение груза с шихтой; С – подъем груза перед загрузкой шихты в печь; 1 – предельное верхнее положение груза; 2 – постановка груза на шихту; 3 – точка достижения установленного уровня шихты в печи

Допустимое различие в показаниях зондов – не более 0,25 м. Правильность показаний зондов должна периодически проверяться (не реже двух раз в месяц).

Не допускается загрузка и работа доменной печи с одним зондом продолжительностью более двух часов. В случае выхода из строя всех приборов автоматического контроля и регистрации уровня засыпи загрузка печи прекращается. В случае задержки загрузки печи из-за неисправности оборудования и других причин температура колошникового газа не должна превышать 500 °С.

Механические зонды позволяют определять уровень шихты только в двух точках. Кроме того, при неровном сходе шихты зонды не удерживаются на поверхности и погружаются в материал, что приводит к неточным показаниям.

Указанные недостатки исключаются при бесконтактном радиометрическом измерении уровня. Радиометрический метод контроля уровня засыпи основан на просвечивании колошникового пространства печи радиоактивными изотопами и на поглощении их излучений шихтовыми материалами. Контроль уровня засыпи осуществляется с помощью следящего уровнемера УРМС (рис. 8.3).

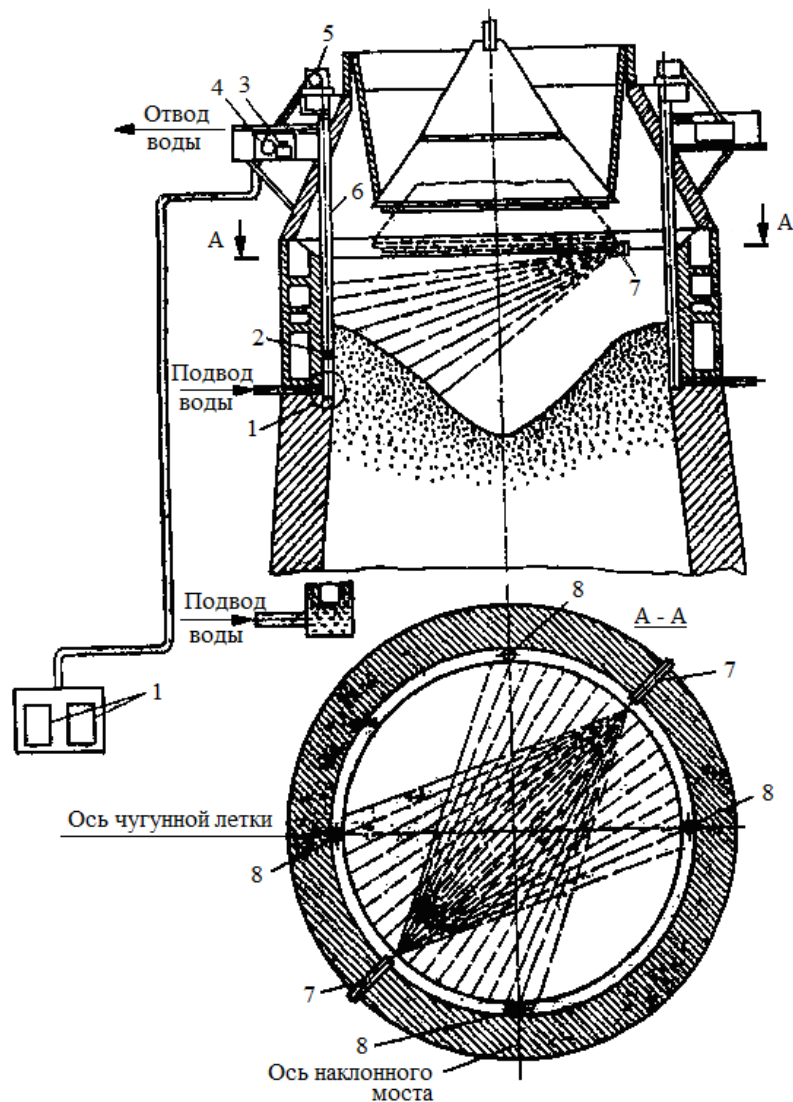


Рис. 8.3. Схема устройства следящего уровнемера [1]

Следящий уровнемер непрерывно автоматически измеряет и регистрирует уровень шихтовых материалов в четырех точках окружности колошника доменной печи. В колошниковой части печи устанавливаются два источника радиоактивного излучения 7 (кобальт-60 или цезий-137). Излучение попадает на диаметрально противоположные стороны колошника, где установлены во-

доохлаждаемые трубы 8, в которых на кабель-тросах 6 подвешены четыре приемника излучения 2. Кабель-трос перекинут через направляющий блок 5 и намотан на барабан лебедки 4, управляемой исполнительным механизмом 3. Сигнал о вертикальном перемещении приемника излучения поступает на регистрирующие приборы 1, установленные на панели контрольно-измерительной аппаратуры.

При опускании шихты увеличивается интенсивность облучения приемника, выходной ток которого возрастает и вызывает включение исполнительного механизма лебедки, вращающей барабан с кабель-тросом. Кабель-трос опускает приемник вслед за опускающейся шихтой. При загрузке очередной порции шихты уровень шихтовых материалов повышается, соответственно уменьшается облучение приемника, что вызывает вращение барабана в обратном направлении.

На ДП № 6 и № 5 ОАО «ЕВРАЗ-НТМК» контроль схода шихтовых материалов производится с помощью двух радиолокационных датчиков. Не допускается работа печи с одним радиолокационным датчиком продолжительностью более двух часов; при кратковременной работе в этих условиях уровень засыпи необходимо понизить на 0,25 м и внимательно следить за режимом загрузки, руководствуясь комплексом показаний приборов и особенно температурой колошника. В случае выхода из строя всех приборов контроля уровня засыпи, загрузка печи не допускается.

Величина уровня засыпи устанавливается начальником доменного цеха и задается мастером на пульте управления (ПУ) печи. Работа с неполнотой печи более 20 минут не допускается. Если в указанное время восстановить заданный уровень засыпи не удастся, необходимо временно понизить форсировку хода печи и произвести загрузку дополнительного кокса или временно снизить рудную нагрузку для обеспечения заданного нагрева. В случае выбора неполноты режим работы лотка изменяется.

За нулевое положение уровня засыпи (технологический «О») принимается уровень, соответствующий внутреннему верхнему срезу цилиндрической части колошника. Во избежание перегруза печи и потери лотка загрузка материалов до получения разрешения от обоих датчиков не допускается.

Проверка правильности показаний устройств для измерения уровня засыпи производится по графику, утвержденному начальником доменного цеха. Результаты проверки записываются в печной журнал. Во всех случаях, когда показания радиолокационных датчиков вызывают у мастера печи сомнение, он организует внеочередную проверку.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Металлургия чугуна: учебник для вузов / под ред. Ю. С. Юсфина. 3-е изд., перераб. и доп. М. : Академкнига, 2004. 774 с. : ил.
2. Примеры и задачи по технологии доменной плавки: учебное пособие / О. П. Онорин, Л. И. Каплун, И. А. Сергиенко, Ю. А. Леконцев. Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 2008. 79 с.
3. Инструкция по проектированию фундаментов доменных печей (ВСН 001-71). М. : Стройиздат, 1972. 64 с.
4. ПБ 11-542-03. Правила безопасности в доменном производстве. М. : Госгортехнадзор, 2003. 43 с.
5. Сорокин Л. А. Работа конструкций доменных печей / Л. А. Сорокин. М. : Metallurgy, 1976. 352 с.
6. Руководство по проектированию стальных конструкций объектов доменных печей большого объема $\left(\frac{P-001-98}{ОПК-2.6214} \right)$. М. : ЦНИИПСК им. Мельникова, 1998. 134 с.
7. Любин А. Е. Металлические конструкции сооружений комплекса доменной печи. Проектирование. Эксплуатация. Диагностика технического состояния / А. Е. Любин. Киев : Сталь, 2010. 472 с.
8. Методика определения технического состояния кожухов доменных печей и воздухонагревателей РД 11-288-99. М. : Госгортехнадзор, 1999. 21 с.
9. Программа расчета футерованных конструкций доменных комплексов РАФК-ПК. М. : ЦНИИПСК им. Мельникова, 1975. 251 с.
10. Байшев Ю. П. Доменные печи и воздухонагреватели (конструкции, эксплуатационные воздействия, свойства материалов, расчеты) / Ю. П. Байшев. Екатеринбург : УрО РАН, 1996. 993 с.
11. Плискановский С. Т. Оборудование и эксплуатация доменных печей / С. Т. Плискановский, В. В. Полтавец. Днепропетровск : Пороги, 2004. 495 с.

12. Производство чугуна на доменной печи № 6 (ВТИ 102-Д130–2004).
Н. Тагил : ОАО «НТМК», 2004. 66 с.
13. Новая концепция загрузки доменной печи / Г. В. Абрамин, Б. М. Боранбаев, А. В. Кошельников, Д. А. Янковский // Сталь. 1999. № 3. С. 1–3.
14. Боранбаев Б. М. Загрузочное устройство с роторным распределителем шихты: пять лет успешной эксплуатации на доменной печи № 3 Бхилайского метзавода / Б. М. Боранбаев, В. Н. Вакулин, В. В. Камендов // Металлург. 2005. № 12. С. 33–41.
15. Боранбаев Б. М. Бесконусное роторное загрузочное устройство – современная технология загрузки шихты / Б. М. Боранбаев, В. Н. Вакулин, Ю. М. Глазер // Metallurg. 2013. № 5. С. 35–40.

Учебное издание

Каплун Лев Исаакович

Малыгин Александр Викторович

Онорин Олег Павлович

Пархачев Александр Васильевич

УСТРОЙСТВО И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ

Редактор *Л.Ю. Козяйчева*

Компьютерная верстка *Г.П. Дудолодовой*

Подписано в печать 01.06.2016. Формат 60х84 1/16.
Бумага писчая. Плоская печать. Усл. печ. л. 12,8
Уч.-изд. л. 9,5. Тираж **150** экз. Заказ № 95

Редакционно-издательский отдел ИПЦ УрФУ
620049, Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 5
Тел.: 8(343)375-48-25, 375-46-85, 374-19-41
E-mail: rio@ustu.ru

Для заметок